

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:

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

Адрес редакции:

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

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:
36946 в каталоге Роспечати

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

Подписано к печати 01.12.2017.
Формат 60х84 1/8.
Уч.-изд.л. 28,25. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 1065.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
4(33)/2017**

Содержание

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5**

Черкасов В.Д., Стешин А.В.
**ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ
С ПОВЫШЕННОЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ 5**

Лесовик В.С., Попов Д.Ю.
**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНА 10**

**Логанина В.И., Кислицына С.Н.,
Демьянова В.С., Мажитов Е.Б.**
**СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО
СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ СИЛИКАТНЫХ КРАСОК... 17**

Пышкина И.С., Жегера К.В.
**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АМОРФНЫХ
АЛЮМОСИЛИКАТОВ И ГИДРОСИЛИКАТОВ
КАЛЬЦИЯ В ИЗВЕСТКОВЫХ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ..... 24**

Максимова И.Н., Макридин Н.И.
**О КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЯХ
ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И
ТВЕРЖДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ.... 29**

Максимова И.Н., Макридин Н.И., Королев Е.В.
**ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМО-
СТЕЙ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, МОДУЛЯ
УПРУГОСТИ И ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ
КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МОДИФИ-
ЦИРОВАННЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОМ С-3
СТРУКТУР ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ..... 36**

Данилов А.М., Гарькина И.А.
**МЕТОД ПРОБНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 47**

Береговой В.А., Снадин Е. В.
**ОБЛЕГЧЕННАЯ КЕРАМИКА ПОВЫШЕННОЙ
ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ 54**

Тараканов О.В., Белякова Е.А.
**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ
ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИНЕ-
РАЛЬНЫМИ И КОМПЛЕКСНЫМИ
ДОБАВКАМИ 60**

© Авторы публикаций, 2017

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2017

© ПГУАС, 2017

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	70	Королева Т.И., Аржаева Н.В., Степанов С.А. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ПОДЗЕМНЫХ АВТОСТОЯНКАХ	142
Бакушев С.В. РАЗРЕШАЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ....	70	Королева Т.И., Аржаева Н.В., Тараканов О.В. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕН- ТИЛЯЦИИ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ ЗОН.....	150
Береговой А.М., Береговой В.А. НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАБИЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ.....	78	Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Ласьков Н.Н., Князев В.А. ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ИСТОЩЕНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ПРОЦЕССЕ МАССОПЕРЕДАЧИ В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЖИДКОСТЬ – ГАЗ	158
Артюшин Д.В., Ласьков Н.Н., Коновалов П.В. МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ СУПЕРКОРОТКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	82	Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Аверкин Ю.А. СТОЛЕТИЕ <i>I-d</i> -ДИАГРАММЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА: УСТРОЙСТВО, ПРИМЕНЕНИЕ, МОДЕРНИЗАЦИЯ	166
Глухов В.С., Глухова М.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ОСАДКИ ЛЕНТОЧНОГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА.....	90	Ерёмкин А.И., Баканова С.В., Кошев А.Н., Родионов Ю.В., Тараканов О.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УВЛАЖНЕ- НИЯ ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА	173
Смирнова Ю.О., Логинова В.В. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ...	96	АРХИТЕКТУРА.....	180
В.М. Вдовин, В.Н. Карпов ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЩИТОВ ДЛЯ ПОЛА ТЕАТРАЛЬНОЙ СЦЕНЫ.....	102	Шумилкин А.С. СОХРАНЕНИЕ ИСТОРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В УС- ЛОВИЯХ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗДАНИЯ РЕМЕСЛЕННОЙ УПРАВЫ В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ).....	180
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	111	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ	186
Перелыгин Ю.П., Бикунцова М.В., Ласьков Н.Н., Шеин А.И. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ ОСАЖ- ДЕНИИ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	111	Домке Э.Р., Жесткова С.А., Акимова В.Ю. ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ГРУЗОВ	186
Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Ежов Е.Г., Грейсхух Г.И., Тараканов О.В. ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУК- ТУРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГАЗОРАСПРЕДЕ- ЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ УГЛЕВОДОРОДНЫМ ГАЗОМ.....	116	Васин Л.А. ЭЛЕКТРОННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА.....	193
Павлов М.В., Лукин С.В., Кочкин А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЦЫ	126	Васин Л.А. ИНТЕГРАЦИЯ СЕРВЕРА КАТАЛОГА С СЕТЕВЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СЛУЖБАМИ СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА	201
Кузина В.В., Кошев А.Н. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ	133	Учаева Т.В., Мебадури З.А. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭФ- ФЕКТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ КРЕДИ- ТОРСКОЙ ЗАДОЛЖЕННОСТЬЮ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	208
		Резник С.Д., Хазова Я.С. СТУДЕНЧЕСКАЯ КАФЕДРА И ЕЕ РОЛЬ В ПОВЫШЕНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ СТРОИ- ТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА.....	215
		Указатель статей, опубликованных в 2017 г.....	228

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	70
Cherkasov V.D., Steshin A.V. CEMENT COMPOSITES WITH INCREASED IMPACT STRENGTH.....	5	Bakushev S.V. RESOLVING EQUATIONS OF FLAT DEFORMATION IN DISPLACEMENT FOR PHYSICALLY AND GEOMETRICALLY NONLINEAR CONTINUUM IN CYLINDRICAL COORDINATES	71
Lesovik V.S., Popov D.Yu. IMPROVING THE EFFICIENCY OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE	10	Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES FOR PROVIDING A STABLE THERMAL MODE IN THE APARTMENTS	78
Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Dem'yanova V.S., Mazhitov E.B. PROPERTIES OF A MODIFIED BINDER FOR SILICATE PAINTS	17	Artyushin D.V., Laskov N.N., Kononov P.V. MODELS OF SHEAR STRENGTH OF SUPERSHORT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.....	82
Pyshkina I.S., Zhegera Ch.V. EFFECTIVENESS OF THE USE OF AMORPHOUS ALUMINOSILICATES AND CALCIUM HYDROSILICATES IN CALCAREOUS DRY BUILDING MIXTURES	24	Glukhov V.S., Glukhova M.V. SETTLEMENT OPTIMIZATION OF PILE-TAPE FOUNDATIONS.....	90
Maksimova I.N., Makridin N.I. ON THE KINETIC DEPENDENCIES OF THE PROCESSES OF STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF CEMENT COMPOSITES	29	Smirnova Yu.O., Loginova V.V. THE IMPACT OF ENERGY EFFICIENCY MEASURES ON THE THERMAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF APARTMENT HOUSES	96
Maksimova I.N., Makridin N.I., Korolev E.V. INTERRELATION OF KINETIC DEPENDENCIES OF INTERNAL FRICTION, THE MODULE OF ELASTICITY, AND PARAMETERS OF DESTRUCTION OF STRUCTURAL DURABILITY OF CEMENT COMPOSITES MODIFIED BY SUPERPLASTIFICATOR C-3.....	36	Vdovin V.M., Karpov V.N. ESTIMATION OF QUALITY AND RELIABILITY OF GLUED WOODEN SHIELDS FOR THE FLOOR OF THEATRE STAGE	102
Danilov A.M., Garkina I.A. METHOD OF TRIAL IMPACT IN IDENTIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS.....	47	ENGINEERING SYSTEMS.....	111
Beregovoi V.A., Snadin E.V. LIGHTWEIGHT CERAMIC WITH INCREASED STRENGTH FOR ENERGY EFFICIENT WALLS STRUCTURES	54	Perelygin Yu.P., Bikunova M.V., Laskov N.N., Shein A.I. CALCULATION OF THE HYDROGEN INDEX OPTIMAL VALUES IN THE PRECIPITATION OF HEAVY METAL IONS IN INDUSTRIAL WASTE WATER	111
Tarakanov O.V., Belyakova E.A. FORMATION OF MICROSTRUCTURE OF CEMENT MATERIALS WITH MINERAL AND COMPLEX ADDITIVES.....	60	Osipova N.N., Grishin B.M., Ezhov E.G., Greysoukh G.I., Tarakanov O.V. FORMATION OF OPTIMUM STRUCTURE OF A REGIONAL GAS DISTRIBUTION SYSTEM FOR SUPPLY OF CONSUMERS WITH LIQUEFIED HYDROCARBON GAS.....	117

Pavlov M.V., Lukin S.V., Kochkin A.A. RESEARCH ON VARIOUS EFFECTS PRODUCED ON GREENHOUSE RADIANT HEATING PARAMETERS 126	ECONOMICS AND MANAGEMENT.. 186
Kuzina V.V., Koshev A.N. MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF PASSIVE IMPURITY TRANSFER IN CONFINED SPACE 133	Domke E.R., Zhestkova S.A., Akimova V.Yu. LOGISTIC APPROACH TO THE ORGANIZATION OF CONSTRUCTION MATERIALS TRANSPORTATION..... 186
Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Stepanov S.A. ORGANIZATION OF SMOKE PROTECT VENTILATION SYSTEMS IN UNDERGROUND CAR PARKS..... 142	Vasin L.A. ELECTRONIC INFORMATION EDUCATIONAL ENVIRONMENT BASED ON OPEN SOURCE SOFTWARE FOR TRAINING SPECIALISTS IN THE FIELD OF CONSTRUCTION. 193
Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Tarakanov O.V. DESIGN FEATURES OF FIREPROOF ZONES VENTILATION..... 150	Vasin L.A. INTEGRATION OF THE DIRECTORY SERVER WITH NETWORK INFORMATION SERVICES UNIVERSITY OF CONSTRUCTION 201
Andreev S.Yu., Garkina I.A., Laskov N.N., Knyazev V.A. ESTIMATION OF EFFECT OF GAS PHASE DEPLETION IN MASS TRANSFER PROCESSES IN THE TWO-PHASE LIQUID-GAS SYSTEMS 159	Uchaeva T.V., Mebaduri Z.A. DEVELOPMENT OF MEASURES FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF ACCOUNTS PAYABLE OF CONSTRUCTION COMPANIES 208
Averkin A.G., Eremkin A.I., Yezhov Y.Y., Averkin Y.A. CENTURY OF I-d-DIAGRAM OF MOIST AIR: DEVICE, APPLICATION, UPGRADE..... 166	Reznik S.D., Khazova J.S. STUDENT DEPARTMENT AND ITS ROLE IN THE DEVELOPMENT OF STUDENT SELF-GOVERNMENT, PERSONAL QUALITIES AND PROFESSIONAL COMPETENCES OF STUDENTS OF A CONSTRUCTION UNIVERSITY 215
Eremkin A.I., Bakanova S.V., Koshev A.N., Rodionov Y.V., Tarakanov O.V. MATHEMATICAL MODEL OF TEXTILE MATERIAL HYDRATION 173	
ARCHITECTURE..... 180	
Shumilkin A.S. PRESERVATION OF HISTORIC ENVIRONMENT IN TERMS OF URBAN DEVELOPMENT (ON THE EXAMPLE OF CRAFT COUNCIL BUILDING IN NIZHNY NOVGOROD)..... 180	

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.32

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

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

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

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

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

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

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

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

ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПОВЫШЕННОЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

В.Д. Черкасов, А.В. Стешин

Приведены результаты исследований ударной вязкости цементных композитов с добавкой волокон и гиперпластификатора. Установлено оптимальное количество волокон и гиперпластификатора для достижения максимальной ударной вязкости цементных композитов.

Ключевые слова: цементный композит, волокна, гиперпластификатор, ударная вязкость

CEMENT COMPOSITES WITH INCREASED IMPACT STRENGTH

V.D. Cherkasov, A.V. Steshin

The results of studies of the impact strength of cement composites with addition of fibers and a hyperplasticizer are presented. The optimal number of fibers and the hyperplasticizer was established to achieve the maximum impact strength of cement composites.

Keywords: cement composite, fibers, hyperplasticizer, impact strength

Ежегодно на Земле происходят тысячи землетрясений, большинство из которых слабые, либо их очаги находятся за пределами населённых территорий. Однако существуют землетрясения с высокой магнитудой, которые происходят вблизи городов. Они наносят существенные повреждения зданиям и даже приводят к их обрушению. В связи с этим является актуальным создание конструкций, обладающих повышенной стойкостью к сейсмическим воздействиям. Решение этой проблемы видится, на наш взгляд, в применении для их изготовления материалов, способных хорошо сопротивляться ударным воздействиям. Основным строительным материалом строительства является бетон. Повышение его динамических свойств можно осуще-

ствить за счет введения в состав волокон [1, 2]. Кроме этого, улучшение свойств бетона достигается использованием химических добавок [3]. Из всех химических добавок для регулирования свойств бетона наиболее широкое применение нашли пластификаторы [3, 4].

В связи с этим были проведены исследования по влиянию различных волокон на прочность при сжатии, на изгиб и на ударную вязкость цементных композитов. Для этого использовали два вида волокон: Rapasea 12 мм и FPAC 235/040. В цементные композиты волокна вводили с пластификатором Master Glenium 51. Исследования были направлены на установление оптимального количества волокон и пластификатора. В ходе проведенных исследований установлено, что оптимальное количество волокна Rapasea 12 мм составляет 1 % от массы цемента (рис. 1, 2), а волокна FPAC 235/040 – 2 % от массы цемента (рис. 3, 4).

Количество пластификатора в составе зависит от вида волокна и конкретного параметра механического свойства. Для волокон Rapasea 12 мм для получения высокой прочности на сжатие и удельной ударной вязкости необходимо добавлять в состав 2 % гиперпластификатора от массы цемента (рис. 5, 6).

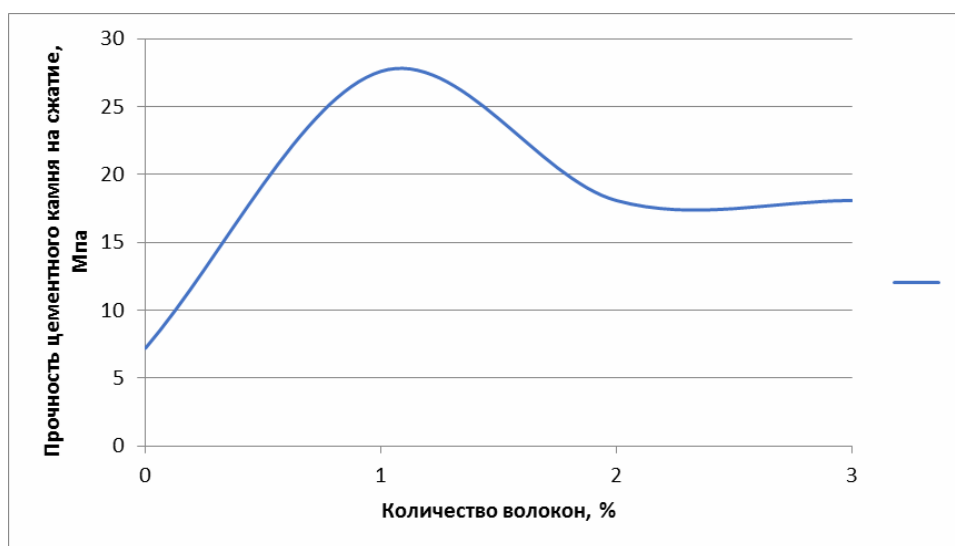


Рис. 1. Влияние количества волокон Rapasea 12 мм на прочность цементного камня при сжатии (количество гиперпластификатора 2 % от массы цемента)

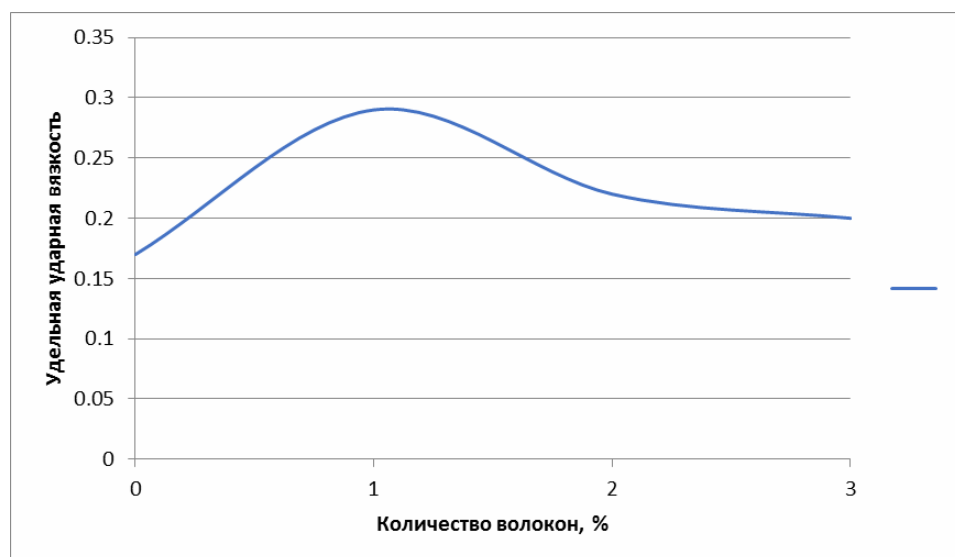


Рис. 2. Влияние количества волокон Rapasea 12 мм на удельную ударную вязкость цементного камня (количество гиперпластификатора 1 % от массы цемента)

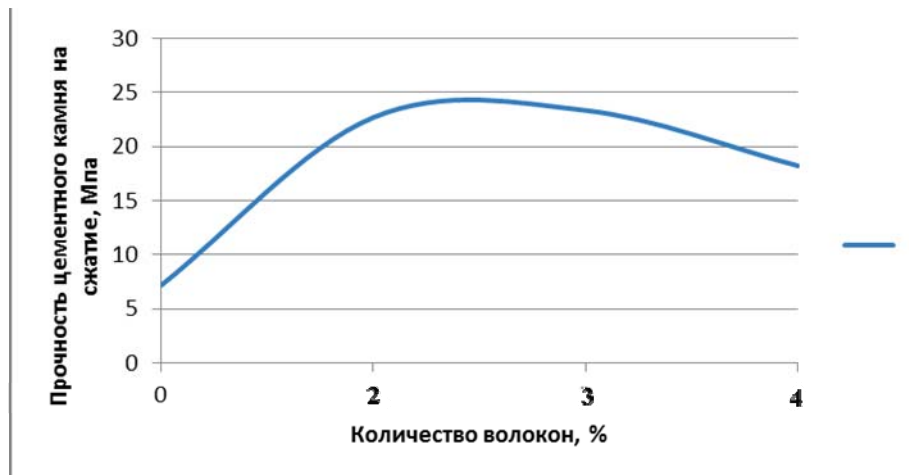


Рис. 3. Влияние количества волокон FRAC 236/040 на прочность цементного камня при сжатии (количество гиперпластификатора 1,5 % от массы цемента)

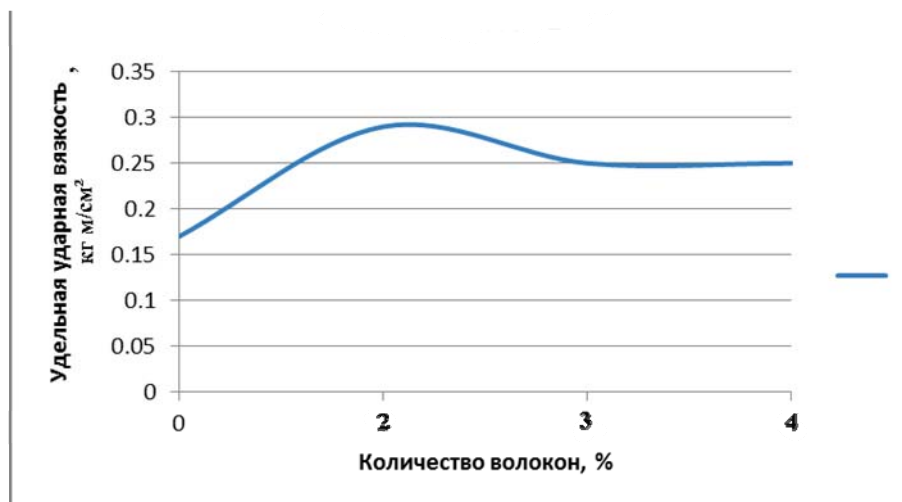


Рис. 4. Влияние количества волокон FRAC 236/040 на удельную ударную вязкость цементного камня (количество гиперпластификатора 1 % от массы цемента)



Рис. 5. Влияние количества гиперпластификатора на прочность при сжатии цементного камня (количество волокон Rapasea 12 мм 1 % от массы цемента)



Рис. 6. Влияние количества гиперпластификатора на удельную ударную вязкость цементного камня (количество волокон Rapasea 12 мм 1 % от массы цемента)

При использовании волокон FPAC 235/040 количество гиперпластификатора для получения высокой прочности при сжатии составляет 1–1,5 % от массы цемента (рис. 7), а для получения высокой удельной ударной вязкости – 1 % от массы цемента (рис. 8).

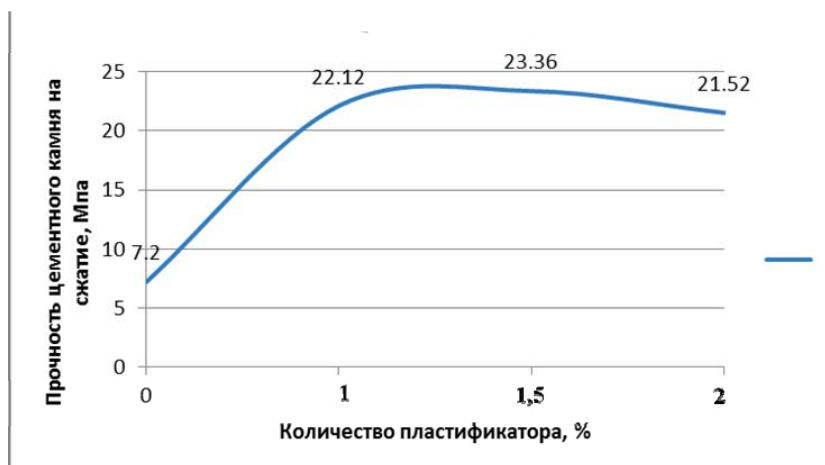


Рис. 7. Влияние количества гиперпластификатора на прочность цементного камня при сжатии (количество волокон FPAC 236/040 2 % от массы цемента)

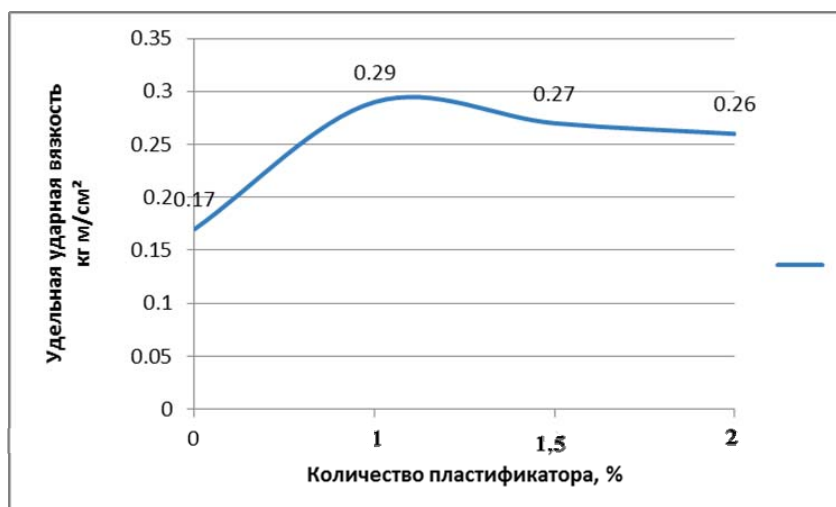


Рис. 8. Влияние количества гиперпластификатора на удельную ударную вязкость цементного камня (количество волокон FPAC 236/040 2 % от массы цемента)

При оптимальных количествах волокон и гиперпластификатора прочность цементного камня при сжатии повышается более чем в три раза (см. рис. 1, 3), а удельная ударная вязкость цементного камня повышается в два раза (см. рис. 2, 3).

Проведённые исследования показали, что с помощью добавления волокон и гиперпластификатора можно существенно повысить удельную ударную вязкость цементного камня. Это, в свою очередь, будет способствовать улучшению динамических свойств бетона.

Список литературы

1. Новицкий, А.Г. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов / А.Г. Новицкий, М.В. Ефремов // Вып. 36. – 2010.
2. Сарайкина, К.А. Дисперсное армирование бетонов / К.А. Сарайкина, В.А. Шаманов // Вестник ПГТУ. Урбанистика. – 2011. – №2. – С. 70–75.
3. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов. – М.: Казанский Государственный архитектурно-строительный университет: Издательство «Палеотип», 2006. — 244 с.
4. Юань, Ю. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами / Юай Юань, Ван Лин, Тянь Пе. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. – 448 с.

References

1. Novitsky, A.G. The aspects of usage of basalt fiber for reinforcement of concrete / A.G. Novitsky, M.V. Efremov // Publ. 36. – 2010.
2. Saraykina, K.A. Disperse reinforcement of concrete / K.A. Saraykina, V.A. Shamanov // Gazette PSTU. Urbanistics. – 2011. – №2. – P. 70–75.
3. Isotov, V.S. Chemical additives for concrete modification / V.S. Isotov. – M.: Kazan State University of Architecture and Construction: Publ. «Paleotip», 2006. – 244 p.
4. Yuan, Yu. High-quality cement concrete with improved features / Yuay Yuan, Van Lin, Tyan Pe. – M.: Association of Construction Universities, Publ., 2014. – 448 p.

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

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

Лесовик Валерий Станиславович,
доктор технических наук, профессор, зав.
кафедрой строительного
материаловедения, изделий и конструкций
E-mail: naukavs@mail.ru

Попов Дмитрий Юрьевич,
аспирант
E-mail: popov.dmitry412@yandex.ru

Belgorod State Technological University.
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukov St.

Lesovik Valery Stanislavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Building Material Science,
Products and Structures»
E-mail: naukavs@mail.ru

Popov Dmitry Yur'evich,
Postgraduate student
E-mail: popov.dmitry412@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНА*

В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов

Рассматриваются основные тенденции современного материаловедения по созданию эффективных композиционных материалов, сокращению нагрузки от собственного веса конструкций и применению современных наукоемких подходов к проектированию. Приводятся основные пути повышения эффективности текстиль-бетона, особенности его приготовления и области применения.

Ключевые слова: легкие конструкции, текстиль-бетон, армирующие материалы, трещинообразование

IMPROVING THE EFFICIENCY OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE

V.S. Lesovik, D.Yu. Popov

The main trends of modern material science are considered in the creation of effective composite materials, the reduce of the load due to the weight of structures and application of modern science-intensive design approaches. The main ways of increasing the efficiency of textile reinforced concrete, features of concrete are preparation and application are given.

Keywords: lightweight structures, textile reinforced concrete, reinforcing materials, cracking

Бетон является одним из самых распространенных и массовых строительных материалов, производство которого в определенной степени характеризует уровень развития цивилизации [1, 2]. Одновременно с этим бетон – это чрезвычайно сложный композиционный материал, который, в связи с его многокомпонентностью, обладает широким спектром уникальных свойств. В настоящее время для его создания используются системный подход к проектированию композиционных материалов [3] и трансдисциплинарные подходы к исследованию [4]. В последние годы технический прогресс в области строительных материалов стал требовать интенсивного развития следующих направлений: повышения прочностных свойств бетона, снижения массы и стоимости бетонных изделий и конструкций, повышения их качества и долговечности [5]. Одним из путей увеличения надежности и долговечности, а также существенного снижения нагрузок от собственной массы при использовании бетонных конструкций является применение текстильных материалов для армирования различных строительных конструкций.

* Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Во многих случаях металлический армирующий каркас может быть с успехом заменен текстилем, часто это вызвано необходимостью создания легких архитектурных конструкций, таких, как арки, перекрытия входов, навесы, козырьки, карнизы и ряд декоративных элементов, а также невозможностью использования стандартной стальной арматуры. Более того, современные тенденции в производстве композиционных материалов, армированных текстилем, заключаются в расширении областей их применения – от второстепенных, не несущих нагрузки элементов к первостепенным несущим конструкционным элементам [6].

Текстиль-бетон – это относительно новый композиционный материал, состоящий из мелкозернистого бетона и текстильной армирующей сетки. Для приготовления текстиль-бетона используется тщательно подобранный состав мелкозернистого бетона, включающий песок, цемент, минеральные наполнители, специальные химические добавки, влияющие на реологические свойства бетонной смеси, и воду. Текстильная сетка применяется в виде сотканых полотен, изготовленных из волокон щелочестойкого АR-стекла или углерода [7]. Текстильная сетка послойно укладывается между слоями бетонной смеси, толщина которых может достигать 3 мм. Этапы создания текстиль-бетона представлены на рис. 1.

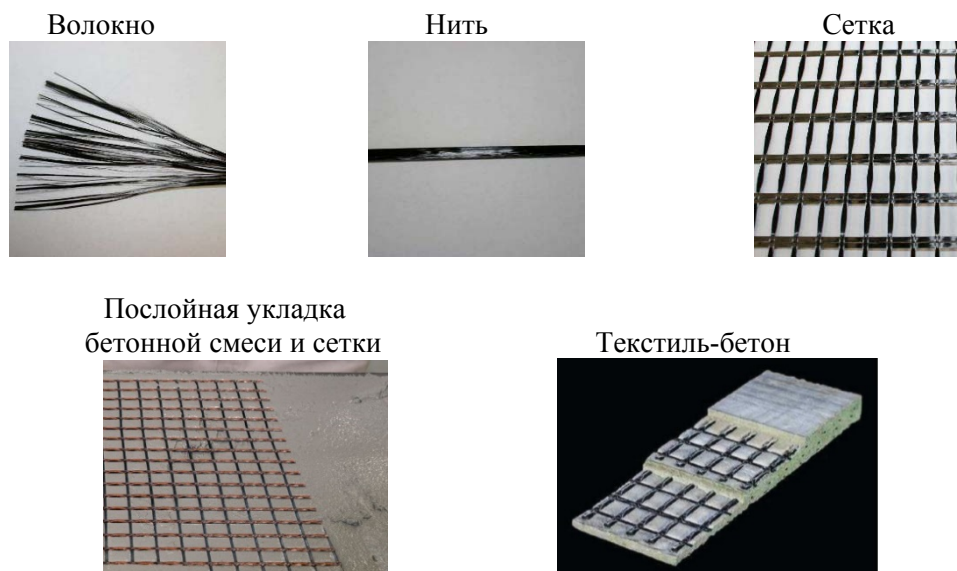


Рис. 1. Этапы создания текстиль-бетона

Свойства текстиль-бетона позволяют успешно использовать его в качестве материала для усиления и реконструкции бетонных и железобетонных сооружений [8]. Армирование стальной арматурой значительно повышает прочностные показатели конструкций, но для защиты стальной арматуры от коррозии требуется защитный слой бетона не менее 35 мм. Это приводит к толщине конструкции более 90 мм. В бетоне, армированном фиброй, много разнонаправленных волокон, малая часть которых воспринимает полезную нагрузку. В текстиль-бетоне армирование может быть направленным и равномерно распределенным. Для защиты армирующей сетки требуется всего лишь слой бетона толщиной 3 мм. При этом общая толщина текстиль-бетона, используемого для усиления зданий и сооружений, колеблется от 10 до 15 мм [6, 9], что значительно меньше по сравнению с толщиной железобетона, применяемого в тех же целях (рис. 2).

Мировой опыт свидетельствует о широкой области применения текстиль-бетона и многообразии изделий и конструкций на его основе. Перспективным является производство сэндвич-панелей и фасадных плит (рис. 3, а) [10, 11]. Возможностями текстиль-бетона пользуются архитекторы и дизайнеры при создании малых архитектурных форм (рис. 3, б), садово-парковой мебели (рис. 3, в) и даже пешеходных мостов (рис. 3, г).

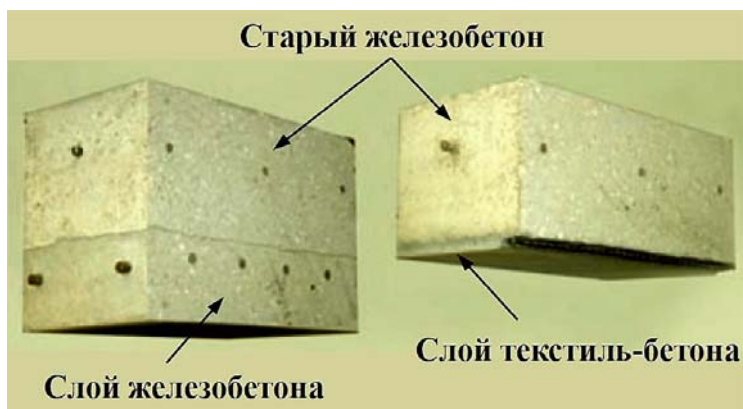


Рис. 2. Конструктивная особенность усиления железобетоном и текстиль-бетоном

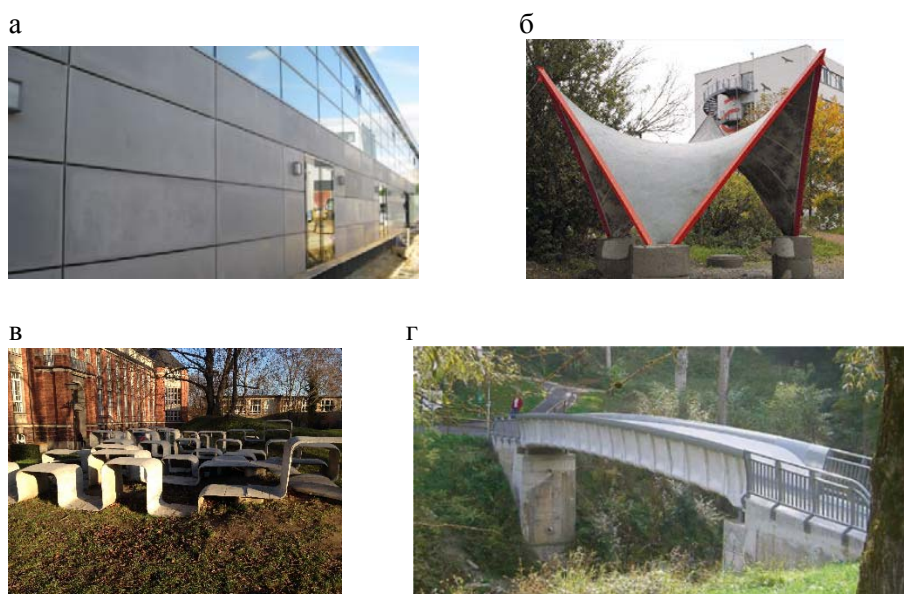


Рис. 3. Применение текстиль-бетона:
а – сэндвич-панели [11]; б – малые архитектурные формы [12];
в – декоративная садово-парковая мебель; г – пешеходный мост [13]

Ввиду конструктивной особенности текстиль-бетона, при его создании возникают определенные трудности достижения желаемого качества композиционного материала. Они вызваны сложностью состава мелкозернистого бетона, реологическими особенностями свежеприготовленной смеси, взаимодействием армирующих текстильных сеток с бетонной матрицей, усадочными явлениями на ранней стадии твердения, трещинообразованием на больших открытых поверхностях.

В отличие от традиционных составов бетонов, для приготовления высокопрочного текстиль-бетона используются многокомпонентные составы мелкозернистого бетона из высококачественных материалов с высоким содержанием цемента, рационально подобранными минеральными наполнителями, способными обеспечить максимальную плотность структуры, и специальными добавками, придающими необходимые реологические свойства бетонной смеси и наделяющими ее требуемыми свойствами.

Физико-механические свойства текстиль-бетона зависят от свойств армирующих текстильных материалов, таких, как прочность, удлинение при разрыве, модуль упругости, геометрические размеры (длина, диаметр, форма волокна и т.д.), объемная доля волокон, адгезия к бетонной матрице и т.д. Для создания текстильных сеток, используемых при армировании цементных бетонов, применяются волокна из щелочестой-

ких материалов. Наиболее распространенным сырьем являются углерод, базальт и щелочестойкое AR-стекло.

Существует широкая номенклатура текстильных армирующих сеток. Углеродные волокна по прочностным свойствам превосходят волокна из базальта и AR-стекла, но их себестоимость в несколько раз выше прочих. Волокна из щелочестойкого стекла имеют высокое удлинение при разрыве (от 2 до 3 %), что приводит к высокой гибкости армированного текстилем бетона. В таблице представлено влияние типов армирующих сеток на несущую способность армированной плиты. Схема испытания показана на рис. 4.

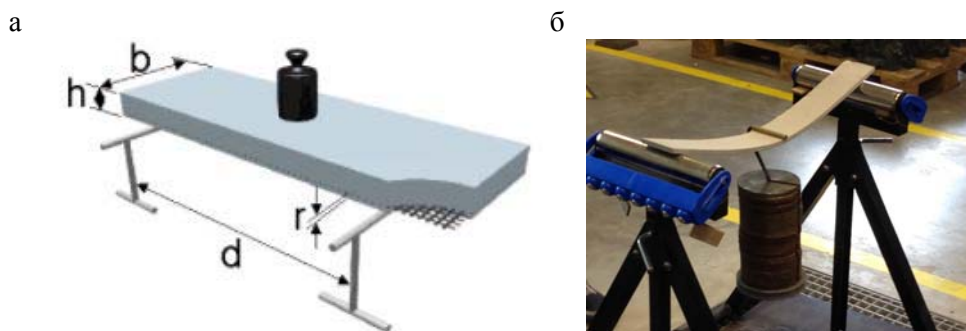


Рис. 4. Испытания армированной плиты:

а – схема испытания (d – расстояние между опорами, b – ширина плиты, h – толщина плиты, r – расстояние между армирующей сеткой и нижней поверхностью плиты);
б – фотография эксперимента

Влияние типа армирующей сетки на несущую способность армированной плиты
при $d = 600$ мм, $b = 200$ мм, $h = 15$ мм, $r = 3$ мм

Тип	Характеристика	Масса груза, кг
Bewehrung Typ 11	AR-стекло, 120 г/м ² , 2D	9
Bewehrung Typ 33	Базальт, 225 г/м ² , 2D	25
Bewehrung Typ 55	Углерод, 149 г/м ² , 2D	49
Bewehrung Typ 111	AR-стекло+Углерод, 213 г/м ² , 2D	103
Bewehrung Typ 214	Углерод, 356 г/м ² , 2D	197
Bewehrung Typ 2121	Углерод, 580 г/м ² , 2D	200

Придание максимальной сцепки армирующей сетки с бетоном является важным фактором обеспечения прочности и долговечности текстиль-бетона. Важно, чтобы в момент приложения внешней нагрузки на текстиль-бетон армирующая сетка воспринимала напряжения совместно с цементной матрицей. В противном случае эффективность текстиль-бетона не будет оправдана (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид образцов после испытаний на разрыв

Сцепление текстильной сетки с бетоном может быть улучшено с помощью изменения поверхности и формы нитей. Для армирования бетона применяются оплетенные и обкрученные нити, которые улучшают сцепление с бетонной матрицей, что воспроизводит структуру композита, схожую со стальной арматурой периодического профиля [14].

Повышение адгезии поверхности текстильных нитей значительным образом сказывается на эффективности текстиль-бетона. Использование растворов из тонкодисперсных минеральных добавок – микрокремнезема и алюмосиликатов – в качестве пропиток доказало свою эффективность в улучшении сцепления пропитанных ими волокон углеродных нитей с бетоном [15, 16].

Конструкции из текстиль-бетона или усиленные текстиль-бетоном бетонные сооружения, как правило, имеют большую площадь открытой поверхности. На ранней стадии твердения, когда цементная матрица еще не набрала необходимой прочности, за счет действия окружающей среды, велико влияние пластической усадки на формирование качественной поверхности материала и прочности в целом. Пластическая усадка цементных материалов может приводить к образованию трещин на поверхности бетона, что в случае с текстиль-бетоном, из-за тонкости самого композита, может привести к его полному разрушению (рис. 6).



Рис. 6. Трещины на поверхности мелкозернистого бетона в результате действия пластической усадки

Одним из важнейших условий для сокращения пластической усадки текстиль-бетона в раннем возрасте и предотвращения трещинообразования является правильный уход на стадии твердения цементной матрицы. Для снижения усадки выделяют внешние и внутренние методы ухода. Внешний уход подразумевает создание благоприятных тепловлажностных условий для протекания процесса твердения. Этого можно достичь при применении водонасыщенных покрытий (влажная мешковина, опилки и т.п.), синтетических защитных покрытий, защиты свежееотформованной конструкции от прямого воздействия ветра и солнечной радиации, при использовании туманов и т.д.

Внутренний уход подразумевает введение в бетонную смесь специальных компонентов, которые служат агентами для последующего ухода. Такие агенты могут быть либо обычными заполнителями, вводимыми в бетонную смесь в увлажненном состоянии, либо дополнительными компонентами, например абсорбирующими добавками или специальными заполнителями. Внутренний уход, обеспеченный абсорбированной водой, минимизирует пластическую усадку, возникающую вследствие быстрого высыхания бетонов, находящихся в неблагоприятных сухих условиях. К таким эффективным средствам внутреннего ухода за бетоном относятся суперабсорбирующие добавки SAP (superabsorbent polymers). SAP – это высокоэффективные впитывающие полимеры последнего поколения, действие которых основано на высокой способности к поглощению и удержанию воды с последующей отдачей [17].

Таким образом, повышение эффективности текстиль-бетона возможно за счет:

- тщательного проектирования состава мелкозернистого бетона;
- использования высокопрочных текстильных армирующих материалов;

- обеспечения надежного сцепления текстильной сетки с бетоном;
- сокращения действия пластической усадки и предотвращения трещинообразования на ранней стадии твердения.

Будущее этого актуального направления в строительном материаловедении связано с внедрением междисциплинарных и трансдисциплинарных подходов к исследованию, с соблюдением системного подхода к проектированию композиционных материалов, с использованием новой сырьевой базы (техногенного сырья с высокой внутренней энергией), с применением композиционных вяжущих, теории техногенного метасоматоза в строительном материаловедении, закона сродства структур и других достижений строительного материаловедения и смежных наук.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны / Ю.М. Баженов // Технологии бетонов. – 2012. – № 3-4 (68-69). – С. 39–42.
2. Лесовик, В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее / В.С. Лесовик // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 1 (100). – С. 9–16.
3. 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.
4. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований / В.С. Лесовик // Высшее образование в России. – 2014. – № 3. – С. 77–83.
5. Ерофеев, В.Т. К вопросу длительной прочности бетона / В.Т. Ерофеев, А.Д. Богатов, Е.А. Ларионов, В.И. Римшин // Архитектура. Строительство. Образование. – 2014. – № 2 (4). – С. 32–43.
6. Jesse, F. Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton / F. Jesse, M. Curbach // Beton- und Stahlbetonbau. – 2009. – H. 1, № 104. – P. 9–16.
7. Curbach, M. Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung / M. Curbach, W. Graf, D. Jesse, J. U. Sickert, S. Weiland // Beton- und Stahlbetonbau. – 2007. – 102. – P. 342–352.
8. Michler, H.: Verstärken mit Carbonbeton im Brückenbau / H. Michler // Tagungsband 26 Dresdner Brückenbausymposium. – 2016. – P. 235–247.
9. Curbach, M. Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! / M. Curbach, H. Michler, S. Weiland, D. Jesse // Beton-Werk International 11. – 2008. – H. 5. – P. 62–72.
10. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: „betoShell“ Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Decke Z-33.1.-577. – 31. Juli – 2008.
11. Shams, A. Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections / A. Shams, M. Horstmann, J. Hegger // Composite Structures. – 2015. – V. 118. – P. 643–653.
12. Gelbrich, S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textilbewehrtem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff / S. Gelbrich // Leichter bauen – Zukunft formen. TUDALIT. – 2012. – V. 7. – P. 9.
13. Scherer, S. Brücken aus Textilbeton / H. Michler, M. Curbach // Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. – 2014. – P. 118–129.
14. Столяров, О.Н. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве / О.Н. Столяров, А.С. Горшков // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №4. – С. 21–25.
15. Nicke, Danilo. Synthese und Charakterisierung mineralischer Beschichtungen auf Carbon faserbündeln für textile Bewehrung zementgebundener Werkstoffe. Projektarbeit. TUD, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe. – 2015. – P. 57.
16. Лесовик, В.С. Изучение основных моментов в создании текстиль-бетона / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов, D. Nicke // Наукоемкие технологии и инновации: сб. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 237–241.

17. Schröfl, C. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage / C. Schröfl, V. Mechtcherine, M. Gorges // *Cement and concrete research*. – 2012. – № 42. – P. 865–873.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Ways of development of building materials science: new concretes / Yu.M. Bazhenov // *Concrete Technology*. – 2012. – № 3-4 (68-69). – P. 39–42.
2. Lesovik, V.S. Construction Materials. Present and Future / V.S. Lesovik // *Vestnik MGSU*. – 2017. – T. 12, № 1 (100). – P. 9–16.
3. Danilov, A.M. System Models in Materials Science: Some Results and Prospects of Use / A.M. Danilov, I.A. Gar'kina, I.S. Pyshkina // *Regional architecture and construction*. – 2015. – № 2 (23). – P. 15–20.
4. Lesovik, V.S. Geonics (geomimetics) as a transdisciplinary research area / V.S. Lesovik // *Higher education in Russia*. – 2014. – № 3. – P. 77–83.
5. Erofeev, V.T. On the issue of long-term strength of concrete / V.T. Erofeev, A.D. Bogatov, E.A. Larionov, V.I. Rimshin // *Architecture. Building. Education*. – 2014. – № 2 (4). – P. 32–43.
6. Jesse, F. Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton / F. Jesse, M. Curbach // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2009. – H. 1, № 104. – P. 9–16.
7. Curbach, M. Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung / M. Curbach, W. Graf, D. Jesse, J. U. Sickert, S. Weiland // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2007. – 102. – P. 342–352.
8. Michler, H.: Verstärken mit Carbonbeton im Brückenbau / H. Michler // *Tagungsband 26 Dresdner Brückenbausymposium*. – 2016. – P. 235–247.
9. Curbach, M. Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! / M. Curbach, H. Michler, S. Weiland, D. Jesse // *Beton-Werk International* 11. – 2008. – H. 5. – P. 62–72.
10. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: „betoShell“ Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Decke Z-33.1.-577. – 31. Juli. – 2008.
11. Shams, A. Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections / A. Shams, M. Horstmann, J. Hegger // *Composite Structures*. – 2015. – V. 118. – P. 643–653.
12. Gelbrich, S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textilbewehrtem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff / S. Gelbrich // *Leichter bauen – Zukunft formen*. TUDALIT. – 2012. – V. 7. – P. 9.
13. Scherer, S. Brücken aus Textilbeton / H. Michler, M. Curbach // *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*. – 2014. – P. 118–129.
14. Stolyarov, O.N. Application of high-strength textile materials in construction / O.N. Stolyarov, A.S. Gorshkov // *Engineering and construction magazine*. – 2009. – №4. – P. 21–25.
15. Nicke, Danilo. Synthese und Charakterisierung mineralischer Beschichtungen auf Carbon faserbündeln für textile Bewehrung zementgebundener Werkstoffe. Projektarbeit. TUD, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe. – 2015. – P. 57.
16. Lesovik, V.S. The study of the main points in the creation of textile-concrete / V.S. Lesovik, D.Yu. Popov, D. Nicke // *High technology and innovation: collection*. – Belgorod: BGTU n. a. V.G. Shukhov, 2014. – P. 237–241.
17. Schröfl, C. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage / C. Schröfl, V. Mechtcherine, M. Gorges // *Cement and concrete research*. – 2012. – № 42. – P. 865–873.

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

Кислицына Светлана Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: kislitsyna_sn@mail.ru

Демьянова Валентина Серафимовна,
доктор технических наук, профессор

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Kislitsyna Svetlana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Technology Building
materials and woodworking»
E-mail: kislitsyna_sn@mail.ru

Dem'yanova Valentina Serafimovna,
Doctor of Sciences, Professor

Mazhitov Erhibulan Bisengalievich,
Graduate student
E-mail: mazhitiv201090@gmail.com

СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ СИЛИКАТНЫХ КРАСОК

В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.С. Демьянова, Е.Б. Мажитов

Приведены сведения о стабильности полисиликатных растворов, полученных смешиванием жидкого стекла и золя кремниевой кислоты. Установлено, что при увеличении количества вводимого золя кремниевой кислоты (увеличении силикатного модуля) наблюдается снижение pH растворов при неизменной концентрации щелочи. Показано, что пленки на основе полисиликатных растворов характеризуются более быстрым отверждением. Выявлено проявление масштабного фактора для пленок на основе полисиликатных растворов.

Ключевые слова: жидкое стекло, полисиликатные растворы, золь кремниевой кислоты, отверждение, относительная твердость

PROPERTIES OF A MODIFIED BINDER FOR SILICATE PAINTS

V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.S. Dem'yanova, E.B. Mazhitov

Information on the stability of polysilicate solutions obtained by mixing liquid glass and silica sol is provided. It is found that when the amount of added silicic acid sol (the increase of silicate module) increases, the pH of the solutions decreases with unchanged alkali concentration. It is shown, that films based on polysilicate solutions are characterized by faster curing. The manifestation of the scale factor for films based on polysilicate solutions is revealed.

Keywords: liquid glass, polysilicate solutions, silicic acid sol, curing, relative hardness

Известно, что покрытия, получаемые на основе обычных жидких стекол, отличаются высокой хрупкостью, низкой адгезией к подложкам из различных материалов (до 5 баллов) и склонностью к отшелушиванию от материала подложки. Для расширения области применения жидких стекол и получения на их основе покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками предлагаются жидкие стекла, модифицированные различными добавками, обладающие улучшенными характеристиками по сравнению с исходным жидким стеклом.

В качестве модификаторов жидкого стекла используют, например, кремнийсодержащие соединения. Так, в случае использования оксида кремния в качестве модифи-

катора жидкого стекла процесс модификации проводят либо смешением жидкого калиевого или натриевого стекла с диоксидом кремния, либо смешением жидкого натриевого стекла с тетраэтоксисилоаном. Процесс модифицирования жидкого стекла оксидом кремния проводят при повышенной температуре (порядка 60–80°C) и при перемешивании [1, 2].

Преимущественное производство натриевых жидких стекол по сравнению с другими видами жидких стекол объясняется большей доступностью сырья и низкой стоимостью при приемлемом уровне некоторых технических свойств стекла [3]. В отечественной литературе известен состав силикатной краски, включающий натриевое жидкое стекло, молотый гранулированный электротермофосфорный шлак, молотый стеклобой, молотый белый волластонит и пигменты, а в качестве модификатора предложено использовать пластифицированную поливинилацетатную эмульсию [4]. Однако покрытия на основе известного состава обладают невысоким уровнем защитных свойств вследствие высокой пористости.

Для повышения стойкости силикатных покрытий предложено использовать полисиликатные растворы, полученные смешиванием жидкого стекла с золой кремниевой кислоты [5, 6]. В работе полисиликатные растворы получали путем взаимодействия высокоактивных форм кремнезема, например частиц SiO_2 коллоидных размеров, при смешивании стабилизированных растворов коллоидного кремнезема (золей) с водными растворами щелочных силикатов (жидкими стеклами) [7]. В работе применяли золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, выпускаемые ПК «Промстеклоцентр». Характеристики кремнезоля приведены в табл. 1. Натриевое жидкое стекло применяли с модулем $M=2,78$, калиевое жидкое стекло – с модулем $M=3,29$.

Т а б л и ц а 1

Характеристики кремнезоля

Наименование показателей	Nanosil 20	Nanosil 30
pH	9-10,8	9-10,6
Массовая концентрация диоксида кремний, г/л	220-237	329-362
Массовая концентрация оксида натрия, г/л	3-7	2,5-6,5
Силикатный модуль	50-90	55-100

Учитывая, что полисиликатные системы не выдерживают длительного хранения, для их стабилизации применяли гидроксид лития [8, 9]. Готовили связующее следующим образом. На первой стадии в водный раствор силиката калия (натрия) вводили порциями безводный гидроксид лития. Перемешивание каждой порции проводили до полного растворения (исчезновения) частиц гидроксида лития, после чего в полученный раствор добавляли при непрерывном перемешивании золь кремниевой кислоты.

В процессе проведения эксперимента определяли модуль жидкого стекла, вязкость связующего. Изучали влияние добавки кремнезоля на изменение pH растворов, модуль жидкого стекла, изменение реологических свойств. Кремнезоль вводили в соотношении 1:0,1; 1:0,15; 1:0,2; 1:0,3. Вязкость определяли вискозиметром ВЗ-4, а также ZM1001, плотность – ареометром АОН-1.

Выявлено, что использование золя в количестве 15-30 % от массы жидкого стекла с модулем $M=2,78$ позволяет получить полисиликатные растворы с модулем $M=4,25-5,29$.

На рис. 1 приведена зависимость pH растворов от различных концентраций золя кремниевой кислоты. Установлено, что при увеличении количества вводимого золя кремниевой кислоты (увеличении силикатного модуля) наблюдается снижение pH растворов при неизменной концентрации щелочи. Так, при содержании золя кремниевой кислоты в количестве 5 % от массы калиевого жидкого стекла pH составляет 12,23, а при содержании золя кремниевой кислоты в количестве 15 % $\text{pH} = 11,85$, в то

время как у контрольного состава (без добавления золя) $\text{pH} = 12,68$. Аналогичные закономерности характерны и для натриевого жидкого стекла.

Установлено, что pH раствора с добавкой золя кремниевой кислоты непрерывно изменяется (см. рис. 1). После смешивания жидкого стекла и золя кремниевой кислоты pH выше, чем на более поздних стадиях. Скорость процесса затухает в течение 27–30 час.

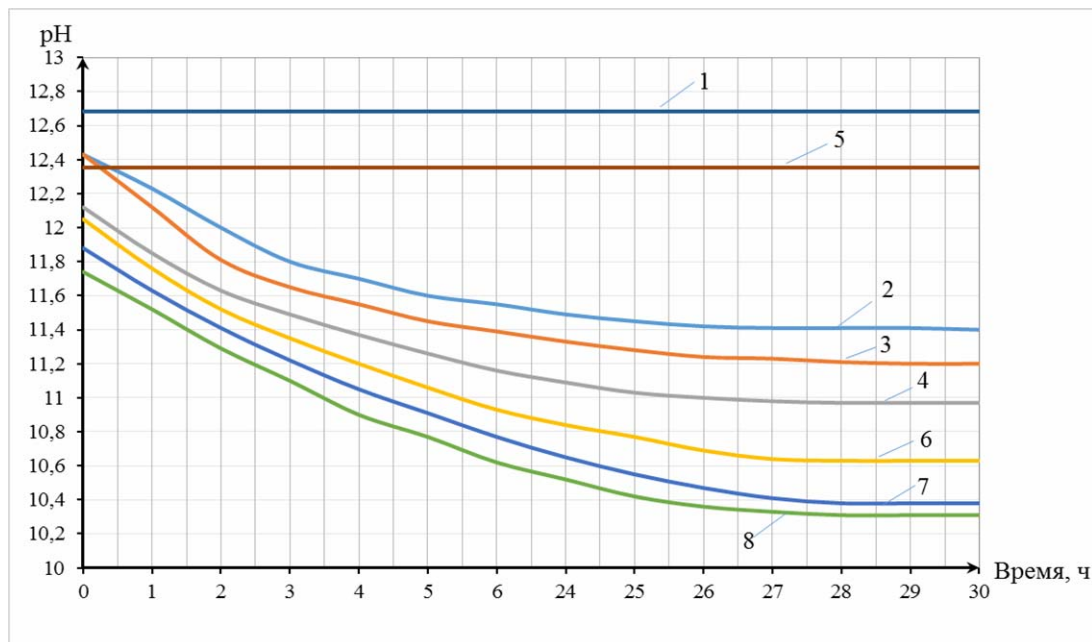


Рис. 1. Кинетика изменения pH силикатных растворов:

1 – калийное жидкое стекло; 2 – калийное жидкое стекло + 5 % Nanosil 20; 3 – калийное жидкое стекло + 10 % Nanosil 20; 4 – калийное жидкое стекло + 15 % Nanosil 20; 5 – натриевое жидкое стекло; 6 – натриевое жидкое стекло + 5 % Nanosil 20; 7 – натриевое жидкое стекло + 10 % Nanosil 20; 8 – натриевое жидкое стекло + 15 % Nanosil 20

Введение золя кремниевой кислоты приводит к изменению вязкости растворов, причем на начальном этапе чем выше содержание золя кремниевой кислоты, тем в более значительной степени наблюдается снижение вязкости (рис.2, табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Влияние добавки золя кремниевой кислоты на реологические свойства калийного жидкого стекла

Жидкое стекло + золь кремниевой кислоты	Содержание золя, %	Плотность раствора, кг/м^3	Вязкость раствора, сек	Динамическая вязкость, $\text{мПа}\cdot\text{с}$	Кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}\cdot 10^{-6}$
Жидкое стекло	-	1348	8,72	1576	1169,1
Nanosil 20					
Раствор 1	5	1333	7,98	1426,8	1070,3
Раствор 2	10	1325	7,74	1375,6	1038,2
Раствор 3	15	1316	7,56	1334,5	1014,05
Nanosil30					
Раствор 1	5	1340	8,09	1454,1	1085,1
Раствор 2	10	1331	7,69	1372,9	1031,5
Раствор 3	15	1325	7,71	1371,3	1034,9

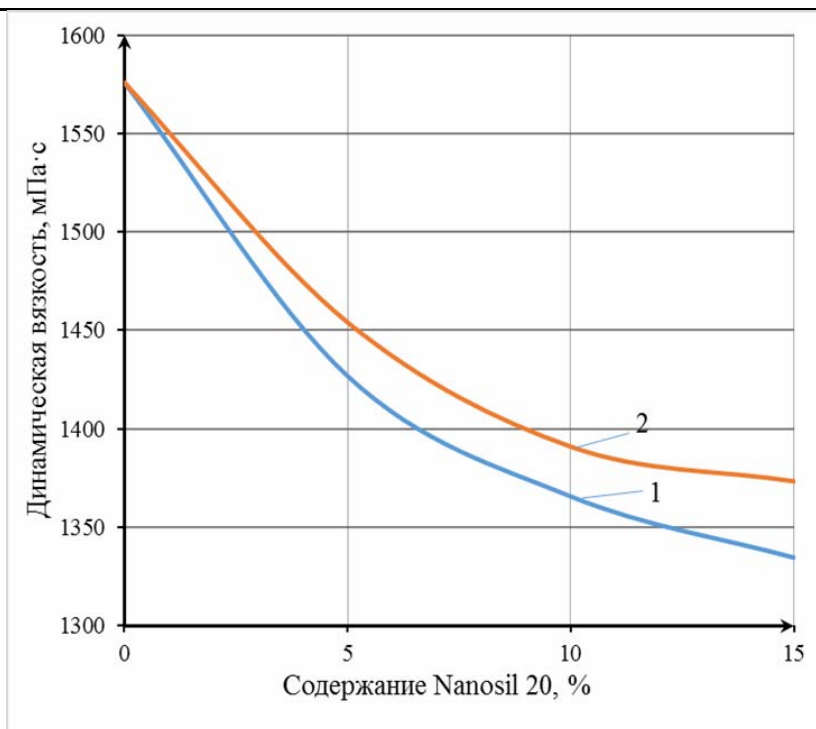


Рис. 2. Изменение динамической вязкости полисиликатных растворов в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты:

1 – калиевое жидкое стекло+ Nanosil 20; 2 – калиевое жидкое стекло + Nanosil 30

Пленки на основе полисиликатных растворов характеризуются более быстрым отверждением. На рис. 3 приведена кинетика отверждения пленок, характеризующаяся изменением относительной твердости. В возрасте 24 час относительная твердость пленки на основе контрольного состава составляет 0,28, а при введении в состав добавки золя Nanosil 20 в количестве 5, 10, 15 % от массы жидкого стекла – соответственно 0,38; 0,43; 0,47. Процесс отверждения происходит в течение 7 суток.

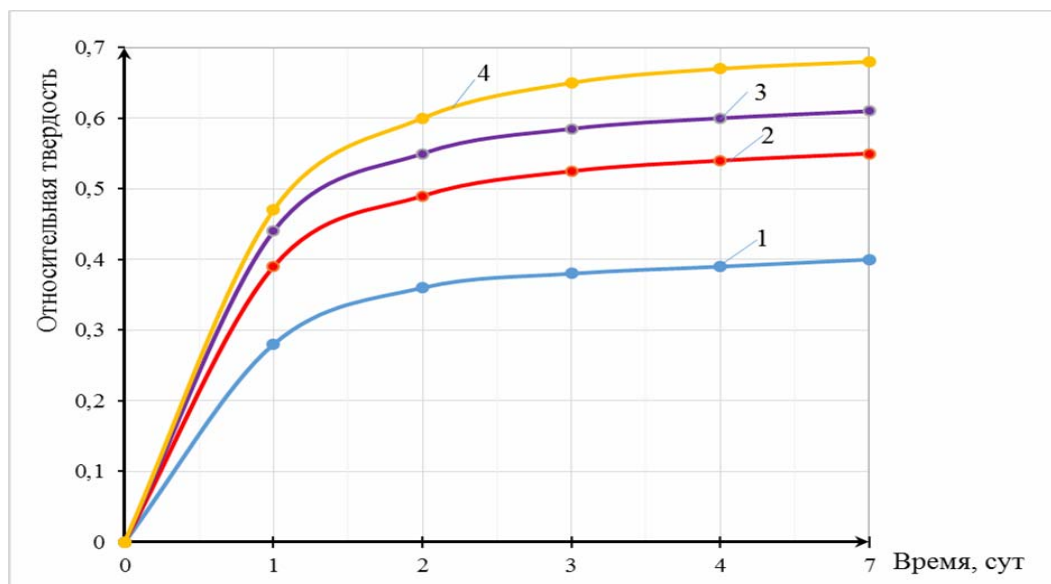


Рис. 3. Изменение во времени относительной твердости пленок на основе полисиликатных растворов:

1 – калиевое жидкое стекло; 2 – калиевое жидкое стекло+5 % Nanosil 20; 3 – калиевое жидкое стекло+10 % Nanosil 20; 4 – калиевое жидкое стекло+15 % Nanosil 20

Для пленок на основе полисиликатных растворов характерно проявление масштабного фактора. С увеличением толщины покрытия наблюдается снижение относительной твердости (рис. 4).

Как видно из полученных экспериментальных данных, с увеличением толщины полимерного покрытия с 0,13 до 0,19 мм относительная твердость снижается с 0,55 до 0,35. Имеет место проявление масштабного фактора. Анализ полученной зависимости относительной твердости покрытий от их толщины показывает, что относительная твердость с увеличением толщины полимерного покрытия уменьшается по линейному закону. Полученная зависимость описывается уравнением

$$y = a + bx, \quad (1)$$

где a, b – константы материала.

Получена расчетная зависимость относительной твердости пленок на основе полисиликатного раствора от их толщины, которая имеет вид

$$y = 0,983 - 3,333x. \quad (2)$$

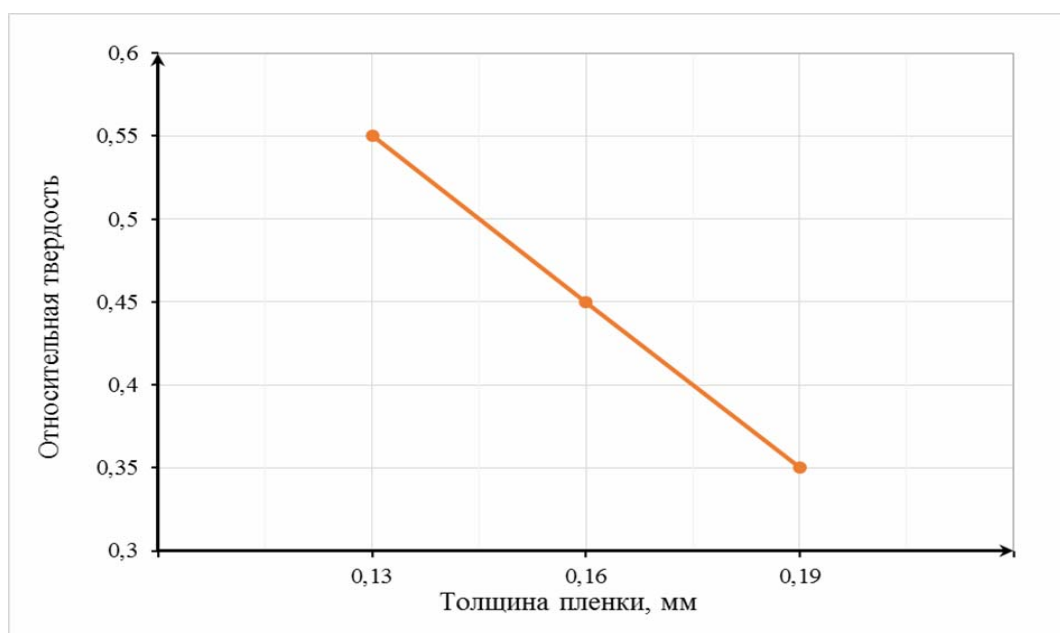


Рис. 4. Влияние толщины покрытия на изменение относительной твердости пленок

Линейный характер зависимости относительной твердости пленок от их толщины свидетельствует о хрупком разрушении пленок.

На основе полисиликатных растворов разработана рецептура краски, предназначенной для фасадов зданий. Покрытия на основе предлагаемой краски характеризуются хорошей удобонаносимостью, ускоренными сроками отверждения, высокой адгезией к бетонной и штукатурной подложкам, характеризующейся 1 баллом по ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии».

Список литературы

1. Способ модифицирования жидкого стекла. Пат. RU 2446100. Емельянова Ольга Николаевна (RU), Кудрявцева Елена Павловна (RU), Киселева Лариса Витальевна (RU); Ковалева Татьяна Владимировна (RU); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный орден трудового красного знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических веществ» (RU) № 2010117936/05, заявлено 06.05.2010; опубликовано 27.03.2012 Бюл. № 9.

2. Силикатная краска. Пат. RU2007430, C09D 1/04. Матвеев Л.Г. (RU), Лазарева В.В. (RU), Шкуро В.Г.(RU), Федотов А.И.(RU), заявитель и патентообладатель Чебоксарское производственное объединение «Химпром» публикация патента; № 2010117936/05, заявлено 06.05.2010; опубликовано 27.03.2012 Бюл. № 9
3. Корнеев, В.И. Производство и применение растворимого стекла / В.И.Корнеев, В.В. Данилов. – Л.:Стройиздат,1991. – 176 с.
4. Силикатная краска А.С. СССР 767154. Г.Т. Пужанов (RU), Н.А. Фалалеева (RU), К.К. Куатбаев (RU), А.А. Вахитов (RU) и В.В. Ли (RU); заявитель и патентообладатель Алма-Атинский научно-исследовательский и проектный институт строительных материалов. Опубл. 30.09.80. Бюл.36.
5. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.
6. Получение и применение гидрозолей кремнезема / под ред. проф. Ю.Г. Фролова // Труды МХТИ им. Менделеева. – 1979. – С. 37.
7. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.51–53.
8. Фиговский, О.Л. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах / О.Л. Фиговский, Д.А. Бейлин, А.Н. Пономарев // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – №3. – С. 6–21.
9. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3, No. 2. – P. 97–101. DOI: 10.4334/IJCSM.2009.3.2.097.
10. Figovskiy, O.L. Nanostructured Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // Vestnik MGSU. – 2014. – N 3. – P. 197–204.
11. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds wich are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Journal «Scientific Israel – Technological Advantages». – 2014. – Vol.16, N2. – P.147–170.
12. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin //J. Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, No 1. – P. 7–12.

References

1. A method for modifying liquid glass. Pat. RU 2446100 Yemelyanova Olga Nikolaevna (RU), Kudryavtseva Elena Pavlovna (RU), Kiseleva Larisa Vitalievna (RU), Kovaleva Tatiana Vladimirovna (RU) Applicant and patent owner FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE «STATE ORDER OF LABOR RED BANNER SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CHEMICAL REACTIVES AND ESSENTIALLY CLEAN CHEMICAL SUBSTANCES «(RU) No. 2010117936/05, filed on May 6, 2010; published on March 27, 2012 Byul. No. 9.
2. Silicate paint Pat. RU 2007430, C09D 1/04. Matveyev L.G. (RU), Lazareva V.V. (RU), Shkuro V.G. (RU), Fedotov A.I. (RU), the applicant and the patent holder Cheboksary Production Association «Khimprom» the publication of the patent; No. 2010117936/05, filed on May 6, 2010; published on March 27, 2012 Byul. No. 9
3. Korneev, V. I. Production and use of soluble glass / V. I. Korneev, V.V. Danilov. – L.: Stroiizdat, 1991. – 176 p.
4. Silicate paint. Certificate of authorship USSR 767154 G.T. Puzhanov (RU), N.A. Falaleeva (RU), K. Kuatbaev (RU), A. Vahitov (RU) and V.V. Li (RU); applicant and patent holder Alma-Ata Research and Design Institute of Building Materials. Published. 30.09.80. Newsletter 36.
5. Eiler P. Chemistry of silica: 2 vol. / P. Eiler. – M.: Mir, 1982.
6. Preparation and use of silica hydrosols / ed. prof. Yu.G. Frolova // Proceedings of the Moscow Art Theater. Mendeleyev. – 1979. – P. 37.

7. Loganina, V.I. Development of the formulation of sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Majitov // Regional Architecture and Construction. – 2017. – No.3. – P.51–53.
8. Figovsky, O.L. Success of nanotechnology application in Building materials / O.L. Figovsky, D.A. Beilin, A.N. Ponomarev // Nanotechnology in construction. – 2012. – No3. – P. 6–21.
9. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3, No. 2. – P. 97–101. DOI: 10.4334/IJCSM.2009.3.2.097.
10. Figovskiy, O.L. Nanostructured Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // Vestnik MGSU. – 2014. – N 3. – P. 197–204.
11. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Journal «Scientific Israel – Technological Advantages». – 2014. – Vol.16, N2. – P.147–170.
12. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin //J. Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, No 1. – P. 7–12.

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Pyshkina Irina Sergeevna,
Candidate of Science,
Associate Professor of the department
«Information and computing systems»
E-mail: glazycheese@gmail.ru

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АМОРФНЫХ АЛЮМОСИЛИКАТОВ И ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ В ИЗВЕСТКОВЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ

И.С. Пышкина, К.В. Жегера

Приведены результаты исследования возможности применения добавок на основе гидросиликатов кальция, синтезированных с применением диатомита, и аморфных алюмосиликатов в качестве модифицирующих в рецептуре известковых сухих строительных смесей. Проведен анализ минералогического состава добавок, исследовано изменение пластической прочности известкового теста в присутствии синтезированных добавок, изучена кинетика изменения прочности известковых образцов. Выявлено, что исследуемые добавки обладают структурирующим действием.

Ключевые слова: гидросиликаты кальция, диатомит, аморфные алюмосиликаты, известь, композиты

EFFECTIVENESS OF THE USE OF AMORPHOUS ALUMINOSILICATES AND CALCIUM HYDROSILICATES IN CALCAREOUS DRY BUILDING MIXTURES

I.S. Pyshkina, Ch.V. Zhegera

The results of study the possibility of using additives based on calcium hydrosilicates synthesized using diatomite and amorphous aluminosilicates modifying dry mortar are presented in the formulation. The analysis of mineralogical composition of the additives has been carried out, the change in the plastic strength of the calcareous test in the presence of synthesized additives has been studied, and the kinetics of the change in the strength of calcareous samples has been studied. It is found that the additives possess a structuring effect.

Keywords: calcium hydrosilicates, diatomite, amorphous aluminosilicates, lime, composites

На протяжении многих лет для реставрации фасадов зданий исторической застройки применялись известковые составы. Однако низкая эксплуатационная стойкость известковых покрытий приводит к увеличению межремонтных затрат. Для повышения эксплуатационных свойств известковых покрытий в рецептуру сухих строительных смесей вводят модифицирующие добавки различного назначения [1–3].

В проведенных ранее исследованиях была подтверждена эффективность введения в рецептуру известковых сухих строительных смесей (ССС) добавок на основе синтезированных гидросиликатов кальция (ГСК) и аморфных алюмосиликатов, способствующих повышению адгезионной прочности, водостойкости и морозостойкости отделочных покрытий [4, 5].

В работах [6, 7] предложено применять в качестве активной добавки гидросиликаты кальция, синтезированные с применением диатомита. Методом рентгенофазового анализа (РФА) установлено, что минералогический состав добавки ГСК, синтезированной с применением диатомита, представлен гидросиликатами кальция тоберморитовой группы, раствором С–S–Н(II), кварцем, каолинитом и гидрогалитами (рис. 1).

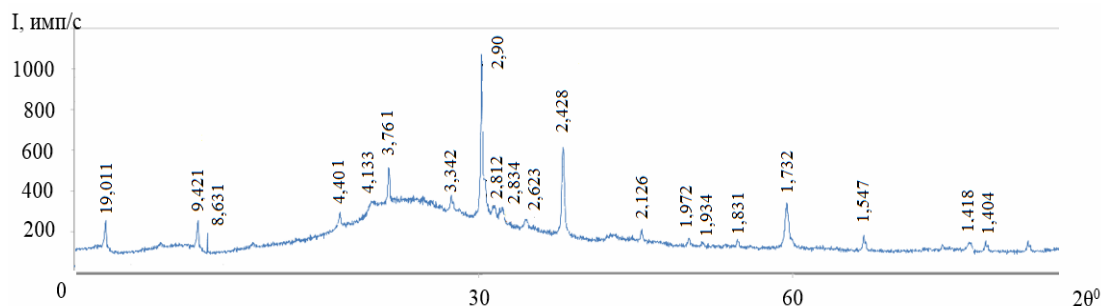


Рис. 1. Рентгенограмма добавки гидросиликатов кальция, синтезированной с применением диатомита

С целью расширения сырьевой базы модифицирующих добавок для известковых сухих строительных смесей в работах [8, 9] предложено применять аморфные алюмосиликаты. Методом рентгенофазового анализа установлено, что состав добавки представлен следующими минералами: тенардит Na_2SO_4 , гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$, минералы группы цеолитов (рис. 2). Концентрация аморфной фазы, определенная полнопрофильным РФА, составляет 77,5 %.

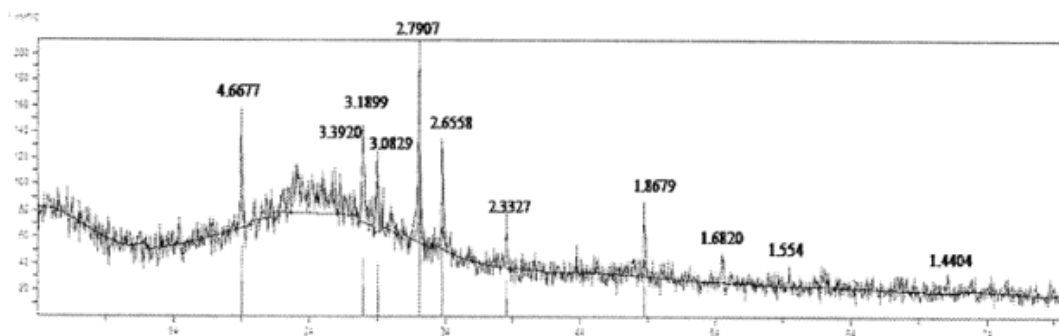


Рис. 2. Рентгенограмма добавки на основе аморфных алюмосиликатов

Результаты проведенных исследований показали, что синтезируемые добавки обладают высокой активностью. Активность определяли по величине растворимости в 20 %-м растворе гидроксида калия.

Так, активность А и растворимость М добавки ГСК, синтезированной в присутствии диатомита, составляют $A=370$ мг/г, $M=70$ %, а добавки на основе аморфных алюмосиликатов $A=350$ мг/г, $M=67$ %.

Дополнительным подтверждением химического взаимодействия модифицирующих добавок с известью служат данные об изменении количества химически свободной извести (рис. 3).

В контрольных образцах в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения количество химически свободной извести составляет 47 % (рис. 3, кривая 1). Количество химически свободной извести у известковых образцов на основе добавки, синтези-

рованной в присутствии диатомита, составляет 25 % (рис. 3, кривая 3), а у известковых образцов с добавкой на основе аморфных алюмосиликатов – 35 % (рис. 3, кривая 3). Таким образом, введение синтезируемых добавок в рецептуру известковых смесей приводит к уменьшению количества свободной извести.

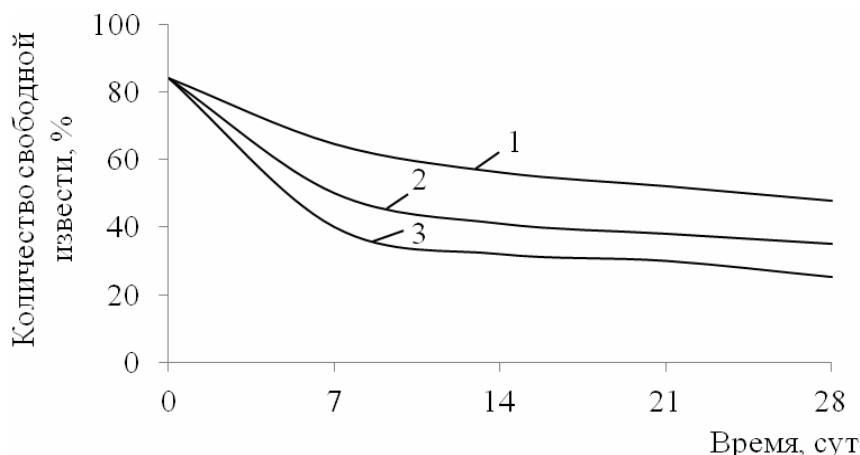


Рис. 3. Изменение количества свободной извести в процессе твердения известковых образцов: 1 – контрольный состав (без добавок ГСК); 2 – известковые образцы с добавкой на основе аморфных алюмосиликатов; 3 – известковые образцы с добавкой на основе гидросиликатов, синтезированных с применением диатомита

В продолжение дальнейших исследований нами оценивалось влияние аморфных алюмосиликатов и ГСК, синтезированных с применением диатомита, на кинетику набора прочности известковых систем.

Исследование кинетики прочности при сжатии известковых композитов в присутствии добавок на основе аморфных алюмосиликатов и ГСК, синтезированных с применением диатомита, показало, что в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения прочность при сжатии $R_{сж}$ для контрольного состава составляет $R_{сж}=2,1$ МПа (рис. 4, кривая 1). При введении в известковое тесто добавки на основе ГСК, приготовленной в присутствии диатомита, прочность составляет $R_{сж} = 7,59$ МПа (рис. 4, кривая 3), а при введении добавки на основе аморфных алюмосиликатов $R_{сж} = 4,7$ МПа (рис. 4, кривая 2).

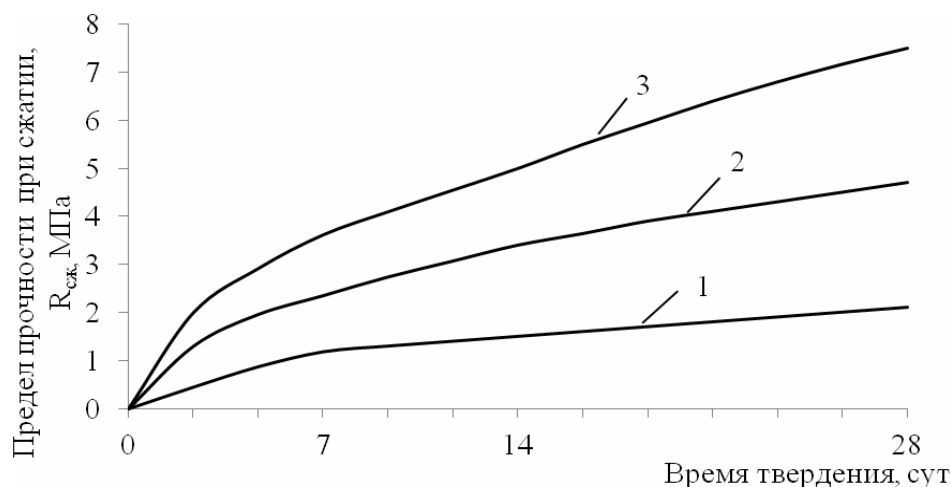


Рис. 4. Кинетика твердения известкового композита: 1 – контрольный образец (без содержания добавок); 2 – с содержанием добавки на основе ГСК, приготовленной в присутствии диатомита; 3 – с содержанием аморфных алюмосиликатов

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения добавок на основе ГСК, приготовленных в присутствии диатомита и аморфных алюмосиликатов, в известковых сухих строительных смесях в качестве структурообразующих добавок.

Список литературы

1. Шангина, Н.Н. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры / Н.Н. Шангина, А.М. Харитонов // Сухие строительные смеси. – 2012. – №3. – С. 35–38.
2. Садовникова, М.А. Применение синтетических цеолитов в качестве модифицирующей добавки в рецептуре цементных и известковых сухих строительных смесей / М.А. Садовникова, К.В. Жегера // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 1 (26). – С. 68–73.
3. Логанина, В.И. Свойства известковых композитов с силикатсодержащими наполнителями / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Строительные материалы. – 2012. – №3. – С. 30–35.
4. Логанина, В.И. Структурообразование известковых композитов в присутствии синтезированных добавок на основе гидросиликатов кальция / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2015. – №1. – С. 81–83.
5. Логанина, В.И. Структурообразование цементного камня в присутствии добавки на основе аморфных алюмосиликатов / В.И. Логанина, К.В. Жегера, И.В. Жерновский // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №3(56). – С. 142–148.
6. Логанина, В.И. Стойкость известковых покрытий с добавкой на основе синтезированных гидросиликатов / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 1 (673). – С. 39–43.
7. Логанина, В.И. Оценка трещиностойкости покрытий на основе сухой строительной смеси с применением синтезированных гидросиликатов / В.И. Логанина, А.Н. Жуков, И.С. Пышкина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 64–67.
8. Жегера, К.В. Применение синтетических цеолитов в качестве модифицирующей добавки в рецептуре цементных и известковых сухих строительных смесей / К.В. Жегера, М.А. Садовникова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1 (26). – С. 68–73.
9. Loganina, V.I. Composition limy binder with the use of the synthesized aluminosilicates for construction blends / V.I. Loganina, R.V. Tarasov, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol.977. – P. 34–37.

References

1. Shangina, N.N. Peculiarities of production and application of dry construction mixtures for the restoration of architectural monuments / N.N. Shangina, A.M. Kharitonov // Dry building mixtures. – 2012. – №3. – P. 35–38.
2. Sadovnikova, M.A. Application of synthetic zeolites as a modifying additive in the formulation of cement and calcareous dry construction mixtures / M.A. Sadovnikova, K.V. Zhegera // Regional architecture and construction. – 2016. – No. 1 (26). – P. 68–73.
3. Loganina, V.I. Properties of calcareous composites with silicate-containing fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Building Materials. – 2012. – №3. – P. 30–35.
4. Loganina, V.I. Structural formation of calcareous composites in the presence of synthesized additives based on calcium hydrosilicates / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // Academic Bulletin UralNIIPROEKT RAASN. – 2015. – №1. – P. 81–83.
5. Loganina, V.I. Structural formation of cement stone in the presence of an additive based on amorphous aluminosilicates / V.I. Loganina, K.V. Zhegera, I.V. Zhernovsky // Herald of Civil Engineers. – 2016. – №3 (56). – P. 142–148.

6. Loganina, V.I. Persistence of calcareous coatings with an additive based on synthesized hydrosilicates / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // News of Higher Educational Establishments. Building. – 2015. – No. 1 (673). – P. 39–43.
7. Loganina, V.I. Evaluation of the crack resistance of coatings on the basis of a dry building mix using synthetic hydrosilicates / V.I. Loganina, A.N. Zhukov, I.S. Pyshkina // Regional architecture and construction. – 2015. – No. 2 (23). – P. 64–67.
8. Zhegera, K.V. Application of synthetic zeolites as a modifying additive in the formulation of cement and lime dry mortars / K.V. Zhegera, M.A. Sadovnikova // Regional architecture and construction. – 2016. – № 1 (26). – P. 68–73.
9. Loganina, V.I. Composition limy binder with the use of the synthesized alumiosilicates for construction blends / V.I. Loganina, R.V. Tarasov, L.V. Makarov, M.A. Sadovnikova // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 977. – P. 34–37.

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

О КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЯХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

И.Н. Максимова, Н.И. Макридин

Приведены экспериментально полученные данные по изучению влияния комплексной химической добавки ПДО-М на кинетические зависимости процессов структурообразования и твердения цементных композитов во временном интервале до 90 суток на двух видах портландцемента: добавочном и бездобавочном.

Ключевые слова: цементный композит, ускоряюще-пластифицирующая добавка, прочность, структурообразование и твердение, конструктивный и деструктивный процессы, математическая модель

ON THE KINETIC DEPENDENCIES OF THE PROCESSES OF STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF CEMENT COMPOSITES

I.N. Maksimova, N.I. Makridin

Experimental data on the effect of complex chemical additive PDO-M on the kinetic dependence of the processes of structure formation and hardening of cement composites in a time interval up to 90 days on two types of Portland cement are presented: with and without additive.

Keywords: cement composite, accelerating-plasticizing additive, strength, structure formation and hardening, constructive and destructive processes, mathematical model

Проблема нарастания прочности цементной дисперсной системы во времени по своей практической значимости остается в центре внимания как отечественных, так и зарубежных исследователей. Однако в публикациях по этой проблеме в основном рассматриваются ранние стадии процессов гидратационного структурообразования, что же касается поздних стадий, то, как отмечено в работе [1], существует давно сложившееся мнение, что регулирование свойств цементного камня в этот период практически невозможно, хотя в этом имеется необходимость. По И.Н. Ахвердову [2], кинетика упрочнения цементного камня во времени описывается не плавной экспоненциальной кривой, а функцией, претерпевающей периодические разрывы; по М.М. Сычеву [3], одной из многих причин «пилообразного» характера изменения прочности «зрелого» бетона во времени является гидролиз связей Si–O–Si, на долю которых приходится до 50–60 % прочности цементного камня.

В работе [4] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания прочности во време-

ни (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств – ростом деформаций во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микро- и макроуровнях.

Проблема нарастания и регулирования длительной прочности приобретает особый интерес в современных условиях поиска путей получения и использования в строительстве бетонов нового поколения, в том числе высокофункциональных, с очень высокими показателями прочности, однородности и низкой пористости, в основу разработки которых положена новая концепция бетоноведения – получение высокоподвижной матричной фазы бетонной смеси с низким водосодержанием благодаря комплексному использованию химических и минеральных добавок, обладающих высокой реологической эффективностью. Вместе с тем использование химических добавок, как известно, является наиболее эффективным методом управления морфологией новообразований гидратационных цементных структур, а следовательно, и характеристикой их порового пространства.

При этом большое практическое значение имеют комплексные добавки, обладающие полифункциональным действием. Одним из таких модификаторов является добавка ПДО-М, которая является комплексной ускоряюще-пластифицирующей добавкой, приготовленной на основе отходов предприятий ПО «Марбиофарм». Основными компонентами добавки являются сульфат натрия – отход производства аскорбиновой кислоты, действующий как ускоритель твердения, и последрожжевой остаток от производства кормовых дрожжей – как пластификатор [5, 6].

В этой связи были проведены исследования по изучению влияния количественной дозировки добавки ПДО-М и возраста бетона в интервале от одних до 90 суток после тепловлажностной обработки на характер изменения прочности $R_{сж}$ и $R_{рн}$, отражающих, в свою очередь, кинетические процессы структурообразования и твердения бетонов в данном диапазоне времени. Прочностные характеристики бетона оценивали на двух видах портландцемента: на бездобавочном и с минеральной добавкой – старооскольском ПЦ М 500-Д0 с нормальной густотой 0,257 и вольском ПЦ М 500-Д20 с нормальной густотой 0,285.

Минералогические составы указанных цемента приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Минералогический состав цемента

Наименование цемента	Марка цемента	Минералогический состав, %				Вид и количество добавки, %
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
Старооскольский	М 500-Д0	62	17	6	13	–
Вольский	М 500-Д20	60	16	6	15	Опока до 20

Для изготовления опытных образцов бетона использовали также Сурский речной песок $M_{кр}=1,63$ и высокопрочный гранитный щебень фракции 5-10 мм. На каждом виде цемента было изготовлено по три серии образцов бетона: первая серия – контрольная (без добавки); вторая и третья серии – с добавкой ПДО-М – 1 и 2 % соответственно – одного состава, с одинаковой удобоукладываемостью, твердевших в одинаковых условиях.

В табл. 2 приведены значения расхода компонентов, показателей удобоукладываемости, соответствующие им В/Ц-отношения и режимы ТВО.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что при получении бетонной смеси постоянной удобоукладываемости на старооскольском цементе с использованием добавки ПДО-М можно добиться сокращения расхода воды на 11-18 %, что позволит отнести ПДО-М к водоредуцирующей добавке второй группы по ГОСТ 24211–2003, в бетонных же смесях на основе вольского цемента ПДО-М расход воды уменьшается на 23–25 %, что дает основание отнести ПДО-М в этом случае к водоредуцирующей добавке

первой группы. Изменение водоредуцирующей способности добавки ПДО-М на сравниваемых цементах, вероятнее всего, обусловлено наличием минеральной добавки.

Т а б л и ц а 2

Рецептура и технологические свойства бетонных смесей

Серии образцов	Расход материала на 1 м ³ бетона, кг			ПДО-М, %	В/Ц	ОК, см	Режим ТВО, ч
	Ц	П	Щ				
На старооскольском цементе							
1	385	774	1100	-	0,539	2-4	12+2+6+3
2	385	774	1100	1,0	0,480	2-4	12+2+6+3
3	385	774	1100	2,0	0,443	2-4	12+2+6+3
На вольском цементе							
1	385	774	1100	-	0,595	2-4	12+2+6+3
2	385	774	1100	1,0	0,455	2-4	12+2+6+3
3	385	774	1100	2,0	0,443	2-4	12+2+6+3

П р и м е ч а н и е . Температура изотермии во всех сериях составляла 70 °С.

В табл. 3 и 4 приведены численные значения величин прочности $R_{сж}$ и $R_{рн}$ сравниваемых серий образцов бетона и средней скорости $\bar{V}$ изменения этих характеристик.

Т а б л и ц а 3

Значения прочностных характеристик R образцов бетона на старооскольском портландцементе и средняя скорость их изменения $\bar{V}$ в контрольные сроки

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

Т а б л и ц а 4

Значения прочностных характеристик R образцов бетона на вольском портландцементе и средняя скорость их изменения $\bar{V}$ в контрольные сроки

Серия образцов	Зависимости	Концентрация ПДО-М, %	Возраст бетона, сут		
			1	28	90
1	2	3	4	5	6
1	$R_{рн} = f(\tau)$, МПа	–	4,11	5,56	6,17
2		1,0	3,92	6,93	7,22
3		2,0	4,52	6,93	5,56
1	$\bar{V}_{R_{рн}} = f(\tau)$, МПа/сут	–	4,11	0,054	0,0098
2		1,0	3,92	0,111	0,0047
3		2,0	4,52	0,089	– 0,022

1	2	3	4	5	6
1	$R_{сж} = f(\tau)$, МПа	–	17,7	38,1	45,2
2		1,0	25,1	44,1	49,8
3		2,0	22,4	43,0	48,3
1	$\bar{V}_{R_{сж}} = f(\tau)$, МПа/сут.	–	17,7	0,756	0,44
2		1,0	25,1	0,704	0,092
3		2,0	22,4	0,763	0,085

Из анализа экспериментальных данных, приведенных в табл. 3, следует отметить, что применение добавки ПДО-М при принятых условиях режима ТВО способствовало незначительному, примерно на 10 %, повышению прочности на сжатие сразу после ТВО на образцах бетона с добавкой ПДО-М 2,0 % и более заметному повышению прочности $R_{ри}$ сразу после ТВО (на 17 и 33 %) – для образцов серий 2 и 3, соответственно. К 28-суточному возрасту кинетика набора прочности $R_{ри}$ и $R_{сж}$ на образцах с добавкой ПДО-М существенно опережала кинетику контрольных образцов. Превышение проектной прочности $R_{сж}$ образцов с добавкой ПДО-М относительно контрольного состава достигало 37,5 %, а прочности $R_{ри}$ – соответственно 15,5 %. Однако в период от 28 до 90 суток наблюдалось заметное изменение кинетики набора прочности $R_{ри}$ и $R_{сж}$ на образцах с добавкой ПДО-М в сторону уменьшения величин как $R_{ри}$, так и $R_{сж}$ при дозировке добавки в количестве 2,0 % примерно на 35 и 8 % соответственно, а при дозировке добавки в количестве 1,0 % отмечено снижение $R_{ри}$ примерно на 15 %, прочность $R_{сж}$ выросла еще на 8 %. В то же время кинетика изменения прочности $R_{ри}$ и $R_{сж}$ контрольных образцов показывала дальнейшее существенное повышение их прочностных свойств. На основании экспериментальных численных значений $R_{ри}$ и $R_{сж}$, приведенных в табл. 3, следует констатировать, что применение добавки ПДО-М при принятом режиме ТВО оказывало в основном негативное влияние на синтез прочности бетона в более поздние сроки после проектного возраста.

Из анализа численных значений $R_{ри}$ и $R_{сж}$, приведенных в табл. 4, следует отметить, что формирование и набор прочности бетона на вольском портландцементе с добавкой ПДО-М носит более позитивный характер по сравнению с бетоном на основе старооскольского цемента.

Столь заметное различие в кинетике набора прочности $R_{ри}$ и $R_{сж}$ образцов бетона на основе сравниваемых цементах при использовании добавки ПДО-М, на наш взгляд, можно объяснить механизмом адсорбции ускоряюще-пластифицирующей добавки. Вероятно, в дисперсных системах на основе вольского портландцемента с минеральной добавкой поверхность тонкодисперсной опоки является предпочтительной для адсорбции добавки ПДО-М, что способствует оптимальному физико-химическому взаимодействию активных центров на поверхности частиц цемента с водой затворения в длительные сроки твердения.

Математическая обработка экспериментальных данных, представленных в табл. 3 и 4, показывает, что кинетика набора прочности бетонов, изготовленных на различных цементах, описывается функцией вида:

$$R_0 = \frac{a + b \cdot \tau}{1 + c \cdot \tau + d \cdot \tau^2}, \quad (1)$$

где a , b , c , d – эмпирические коэффициенты; τ – время твердения.

Значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 5.

Значения эмпирических коэффициентов

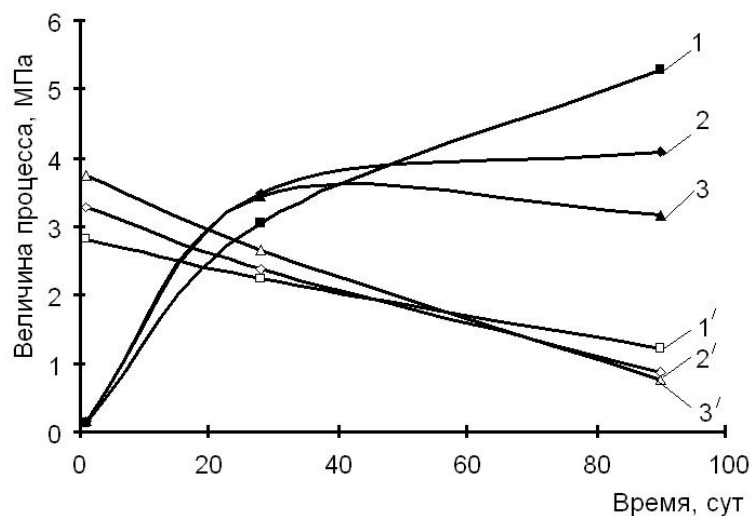
Зависимости	Концентрация ПДО-М, %	Эмпирические коэффициенты			
		a	b	$c \cdot 10^3$	$d \cdot 10^5$
Старооскольский цемент					
$R_{\text{ри}} = f(\tau)$ (табл. 3)	–	2,83	0,14	6,8	8,9
	1	3,23	0,17	5,9	28,0
	2	3,75	0,17	1,5	47,0
$R_{\text{сж}} = f(\tau)$ (табл. 3)	–	15,76	0,66	4,2	6,0
	1	15,25	0,99	5,6	17,3
	2	16,83	1,37	5,2	29,0
Вольский цемент					
$R_{\text{ри}} = f(\tau)$ (табл. 4)	–	4,04	0,97	5,8	6,33
	1	3,76	0,19	6,8	15,3
	2	4,37	0,18	5,0	26,7
$R_{\text{сж}} = f(\tau)$ (табл.4)	–	16,68	1,12	5,4	13,6
	1	24,15	1,06	4,4	12,4
	2	21,41	1,15	4,8	4,1

В процессе твердения бетона вследствие протекания физико-химических процессов развиваются два конкурирующих процесса: конструктивный, приводящий к повышению прочности бетона, и деструктивный, повышающий дефектность структуры материала. Предлагаемая зависимость (1) учитывает влияние этих процессов:

– конструктивный процесс
$$f_k = \frac{b \cdot \tau}{1 + c \cdot \tau + d \cdot \tau^2}; \quad (2)$$

– деструктивный процесс
$$f_d = \frac{a}{1 + c \cdot \tau + d \cdot \tau^2}. \quad (3)$$

Графическое представление влияния конструктивного и деструктивного процессов на предел прочности при изгибе бетона, изготовленного на старооскольском цементе, приведено на рисунке.



Кинетика изменения конструктивного и деструктивного процессов:

1, 1' – соответственно, конструктивный и деструктивный процессы для немодифицированного бетона; 2, 2' – то же для бетона, модифицированного 1,0 % ПДО-М; 3, 3' – то же для бетона, модифицированного 2,0 % ПДО-М

Анализ графических зависимостей рисунка показывает, что конструктивный процесс для немодифицированного бетона к 90 суткам твердения не завершен. При этом необходимо отметить, что к 28 суткам твердения такой бетон имеет наименьшие значения как конструктивного, так и деструктивного процесса. Для бетонов, модифицированных добавкой ПДО-М, к 90 суткам твердения наблюдается стабилизация (при 1,0 % ПДО-М) или снижение (при 2,0 % ПДО-М) величины конструктивного процесса, что приводит к уменьшению прочности бетона.

Следует отметить также, что аналогичные зависимости для конструктивного и деструктивного процессов наблюдаются при испытаниях бетона на сжатие.

Обобщение авторами результатов исследований [7–9], в том числе собственных [10–12], позволяет констатировать, что рациональным способом регулирования структуры и свойств бетонов конструкционного назначения является модифицирование композиционных смесей химическими добавками пластифицирующего действия.

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

Список литературы

1. Мчедлов-Петросян, О.П. Структурообразование и твердение / О.П. Мчедлов-Петросян // Технологическая механика бетонов: сб. науч. тр. – Рига, 1988. – С. 85–94.
2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Сычев, М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня / М.М. Сычев // Журнал прикладной химии. – 1981. – Т. 54. – С. 2036–2043.
4. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 25–27.
5. Рекомендации по подготовке к утилизации отходов предприятий ПО «Марбиофарм» и приготовлению на их основе ускоряюще-пластифицирующей добавки ПДО-М для сборного и монолитного железобетона / В.И. Калашников [и др.]; Пензенский ИСИ: ПО «Марбиофарм» Минмедбиопроба СССР. – Пенза, 1989. – 13 с.
6. Рекомендации по применению ускоряюще-пластифицирующей добавки ПДО-М в производстве сборного и монолитного железобетона / В.И. Калашников [и др.]; Пензенский ИСИ; НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Пенза, 1989. – 16 с.
7. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
8. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
9. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2004. – 564 с.
10. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
11. Прочность и параметры разрушения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2015. – 360 с.
12. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: АСВ, 2017. – 400 с.

References

1. Mchedlov-Petrosyan, O.P. Structurization and hardening / O.P. Mchedlov-Petrosyan // Technological mechanics of concretes: a collection of scientific papers. – Riga, 1988. – P. 85–94.
2. Ahverdov, I.N. Basics of concrete physics / I.N. Ahverdov. – M.: Strojizdat, 1981. – 464 p.
3. Sychev, M.M. Some questions of chemistry of concrete and cement stone / M.M. Sychev // Journal of Applied Chemistry. – 1981. – T. 54. – P. 2036–2043.
4. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Geniev // Concrete and Reinforced Concrete. – 1995. – No. 4. – P. 25–27.
5. Recommendations on preparation for utilization of waste products of enterprises of «Marbiopharm» and preparation of accelerating-plasticizing additive PDO-M for prefabricated and monolithic reinforced concrete on their basis / V.I. Kalashnikov [etc.]; Penzenskiy ISI: PA «Marbiopharm» of the USSR Ministry of Mediobiography. – Penza, 1989. – 13 p.
6. Recommendations on the application of the accelerating-plasticizing additive PDO-M in the production of prefabricated and monolithic reinforced concrete / V.I. Kalashnikov [etc.]; Penza ICI; NIIZhB Gosstroy USSR. – M.; Penza, 1989. – 16 p.
7. Batrakov, V.G. Modified concrete. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2nd edition. – M.: Stroyizdat, 1998. – 768 p.
8. Bazhenov, Yu.M. Modified high-quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – M.: ASV, 2006. – 368 p.
9. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2004. – 564 p.
10. Makridin, N.I. Pattern formation and the structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MSUCE, 2013. – 152 p.
11. Strength and parameters of destruction of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – Saransk: Publishing house of the Mordovian University, 2015. – 360 p.
12. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: ASV, 2017. – 400 p.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

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

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

*National Research Moskovsky State University
of Civil Engineering*

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

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

ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОМ С-3 СТРУКТУР ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

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

Приведены экспериментально полученные данные по изучению влияния суперпластификатора С-3 на кинетические зависимости процессов структурообразования и твердения высокопрочных цементных композитов, контролируемых по характеру изменения коэффициента внутреннего трения и динамического модуля упругости во временном интервале до 500 суток. Получены математические зависимости изменения коэффициента внутреннего трения и динамического модуля упругости в зависимости от времени твердения и математическая модель взаимосвязи динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения. Дана оценка физико-механических свойств, параметров разрушения конструкционной прочности и энергии акустической эмиссии сравниваемых серий цементных композитов на диаграмме нагружения опытных образцов типа I.

Ключевые слова: цементный композит, структура, модификатор, внутреннее трение, модуль упругости, прочность, резонансная частота, вязкость разрушения, критическая скорость высвобождения энергии, акустическая эмиссия, математические модели, матричная фаза

INTERRELATION OF KINETIC DEPENDENCIES OF INTERNAL FRICTION, THE MODULE OF ELASTICITY, AND PARAMETERS OF DESTRUCTION OF STRUCTURAL DURABILITY OF CEMENT COMPOSITES MODIFIED BY SUPERPLASTIFICATOR C-3

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

Experimental data on the effect of superplasticizer C-3 on the kinetic dependences of the processes of structure formation and hardening of high-strength cement composites controlled by the nature of the change in the coefficient of internal friction and the dynamic modulus of elasticity in time interval of up to 500 days are presented. Mathematical dependences of the change of coefficient of internal friction and the dynamic modulus of elasticity on the hardening time and the mathematical model of the relationship between the dynamic modulus of elasticity and the coefficient of internal friction are obtained. Estimation of physicomechanical properties, parameters of destruction of structural strength and energy of acoustic emission of compared series of cement composites on the load diagram of experimental samples of type I is given.

Keywords: cement composite, structure, modifier, internal friction, modulus of elasticity, strength, resonant frequency, fracture toughness, critical energy release rate, acoustic emission, mathematical models, matrix phase

Повышение прочности бетона в результате применения пластифицирующих добавок обусловлено не только сокращением воды в бетонной смеси, а следовательно, и объема пор в цементном камне, но и диспергированием агрегированных частиц цемента, изменением электрических явлений на межфазных границах цементных частиц и условий протекания процесса гидратации, что приводит к образованию более высокого содержания гелевой составляющей цементного камня.

В работах [1–3] показано влияние концентрации и процедуры введения суперпластификатора (СП) С-3 в цементно-водную композицию на субмолекулярную гетерогенность структуры цементного камня. По ионизационным рентгенограммам цементного камня в возрастном диапазоне от 28 суток до 4,5 лет определены величины его блоков мозаики L_d по О.П. Мчедлову-Петросяну [4], позволяющие судить о гранулометрической однородности структуры образующихся фаз, о степени упорядоченности кристаллов, о величине удельной поверхности образующихся фаз и плотности дислокаций в структуре, определяющих в конечном счете прочность цементного камня как матричной основы бетонов повышенной прочности. Однако все эти известные данные не раскрывают влияние СП С-3 на кинетические зависимости модуля упругости и внутреннего трения высокопрочного бетона.

В данной работе представлены результаты изучения влияния добавки СП С-3 на формирование реальной микро- и макроструктуры бетонов повышенной прочности с помощью кинетических зависимостей коэффициента внутреннего трения и динамического модуля упругости. Как известно, внутренним трением твердого тела называется свойство этого тела необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную ему в процессе деформирования. Различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую обусловлены атомным и молекулярным строением материалов, что позволяет считать метод измерения внутреннего трения весьма эффективным современным физическим методом изучения реальной дисперсно-кристаллитной структуры цементных дисперсных систем. Метод внутреннего трения является структурно-чувствительным методом изучения тонкого строения твердых тел. Для измерения внутреннего трения и динамического модуля упругости бетона использовали прибор ИКВТ-2, коэффициент внутреннего трения $K_{вТ}$ и модуль упругости E_d в котором определяются с помощью резонансной характеристики, полученной при изгибных колебаниях опытного образца.

Для изготовления опытных образцов использовали портландцемент М-400 Старооскольского завода, известняковый щебень фракции 5–10 мм, кварцевый речной песок с модулем крупности 1,57 и СП С-3. Было изготовлено три серии образцов.

Бетонная смесь первой серии с В/Ц=0,306 – контрольная – без использования СП С-3. Бетонная смесь второй серии также с В/Ц=0,306, но с добавкой СП С-3 в количестве 1 % от массы цемента. Бетонная смесь третьей серии также с добавкой СП С-3 в количестве 1 %, но с уменьшенным расходом воды, т.е. с В/Ц=0,242.

Расчетный расход цемента, мелкого и крупного заполнителя на 1 м³ бетона во всех сериях был принят одинаковым и составлял: цемента и песка – по 620 кг и щебня – 940 кг. Время уплотнения при формировании опытных образцов при стандартных параметрах вибрации: для первой серии – 120 с, для второй серии – 10 с и для третьей – 70 с. Плотность образцов по уплотненной бетонной смеси для первой, второй и третьей серий образцов составляла соответственно 2300; 2360 и 2380 кг/м³.

После формирования образцы бетона подвергали термовлажностной обработке в лабораторной пропарочной камере по стандартному режиму, а затем после распалубки их подготавливали к испытаниям в соответствии с требованиями инструкции [5].

Оценку E_d и K_{BT} образцов осуществляли с помощью прибора ИКВТ-2 [5], принцип работы которого заключается в том, что в образце испытываемого материала возбуждаются механические колебания изгиба. Испытательная схема прибора показана на рис. 1.

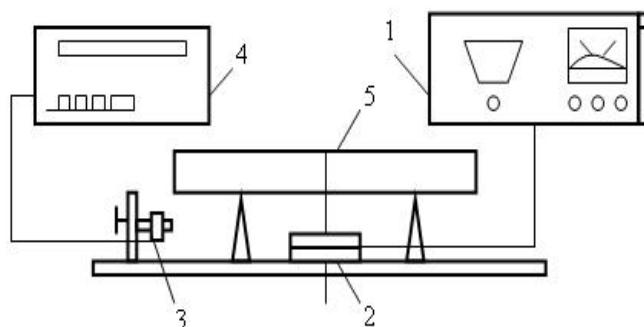


Рис. 1. Испытательная схема прибора ИКВТ-2:

1 – генератор звуковой частоты; 2 – возбудитель колебаний;
3 – электромагнитный преобразователь; 4 – частотомер Ф5035; 5 – образец

Пользуясь значением измеренной резонансной частоты колебаний образца прямоугольного сечения, динамический модуль упругости определяли по формуле

$$E_d = 0,965 \cdot 10^{-6} (l/b)^3 \cdot ((P - f^2)/a) T, \quad (1)$$

где l , b , a – соответственно длина, высота, ширина образца, см; P – масса образца, г; f – резонансная частота колебаний изгиба, Гц; T – коэффициент, учитывающий размер образца ($T=1,07-2$); $0,965 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент, учитывающий основной вид колебаний образца и размерность выбранных единиц измерения.

Коэффициент внутреннего трения определяли по формуле

$$K_{BT} = \Delta f / (\sqrt{3} \cdot f), \quad (2)$$

где Δf – ширина резонансной характеристики образца на уровне половины максимальной амплитуды изгибных колебаний по обе стороны от резонанса (рис. 2).

Коэффициент внутреннего трения, получаемый при изгибных колебаниях образца, является мерой внутреннего трения структуры реальных материалов.

Исследования включали изучение в течение 500 суток на образцах бетона, хранившихся в обычных лабораторных условиях, следующих кинетических зависимостей: коэффициента водоотдачи, коэффициента внутреннего трения, динамического модуля упругости, а также зависимости динамического модуля упругости от коэффициента внутреннего трения, прочности на осевое сжатие и растяжение при изгибе, а также параметров разрушения – вязкости разрушения K_{IC} , критической интенсив-

ности (скорости) высвобождения энергии G_{IC} и суммарной энергии акустической эмиссии на кривой нагружения при трехточечном изгибе опытных образцов бетона сравниваемых составов в возрасте 420 суток.

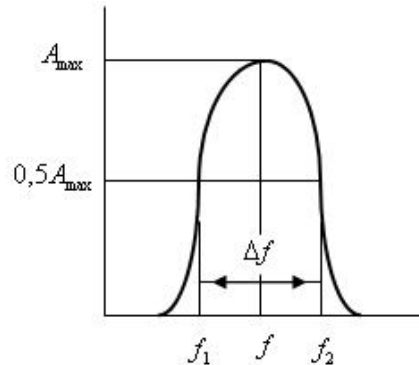


Рис. 2. Полоса резонансной характеристики образца

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по кинетике изменения коэффициента внутреннего трения образцов сравниваемых серий бетона, а также расчетные графические зависимости. Регрессионный анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее оптимальная зависимость имеет следующий вид:

$$K_{BT} = a + b\tau + \frac{c}{\tau^2}, \quad (3)$$

где a , b , c – эмпирические коэффициенты; τ – время наблюдений.

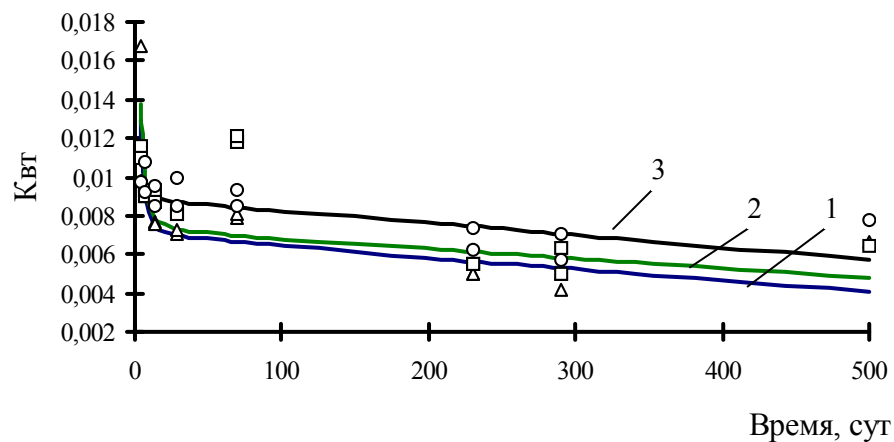


Рис. 3. Зависимость коэффициента внутреннего трения бетона от его возраста:
1 – контрольный состав с В/Ц = 0,306; 2 – рабочий состав с В/Ц = 0,306 и 1 % СП С-3;
3 – рабочий состав с В/Ц=0,242 и 1 % СП С-3

Значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Состав бетона	Значения эмпирических коэффициентов		
	a	b	c
Состав №1	0,006989	$-5,86 \cdot 10^{-6}$	0,0949
Состав №2	0,0073	$-5 \cdot 10^{-6}$	0,104
Состав №3	0,008894	$-6,4 \cdot 10^{-6}$	0,0183

Необходимо отметить, что аналогичной математической зависимостью описывается и процесс влагопотерь опытных образцов, представленный на рис. 4, а значения

эмпирических коэффициентов – в табл. 2. Номера кривых на рис. 4–7 соответствуют номерам серий сравниваемых составов бетона, приведенных на рис. 3.

Т а б л и ц а 2

Состав бетона	Значения эмпирических коэффициентов		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Состав №1	1,0073	$-5,46 \cdot 10^{-6}$	0,168
Состав №2	1,0039	$-1,03 \cdot 10^{-5}$	0,119
Состав №3	1,0069	$-1,613 \cdot 10^{-5}$	0,0089

Анализ экспериментальных данных и расположение теоретических кривых на рис. 3 свидетельствуют о том, что адсорбция молекул СП С-3 на цементных частицах в составе бетона как серии 2, так и серии 3 приводит к численному увеличению значения внутреннего трения, что обусловлено ухудшением условий возникновения контактов срастания продуктов гидратации цементного камня, а также к более тщательному диспергированию агрегированных частиц цемента и более равномерному распределению воды затворения на вскрытых физико-химическим диспергированием поверхностях ультрадисперсных частиц, в результате чего большее количество воды испытывает молекулярное притяжение со стороны поверхности твердого тела, что, вероятно, подтверждается кинетическими зависимостями влагопотерь, приведенными на рис. 4.

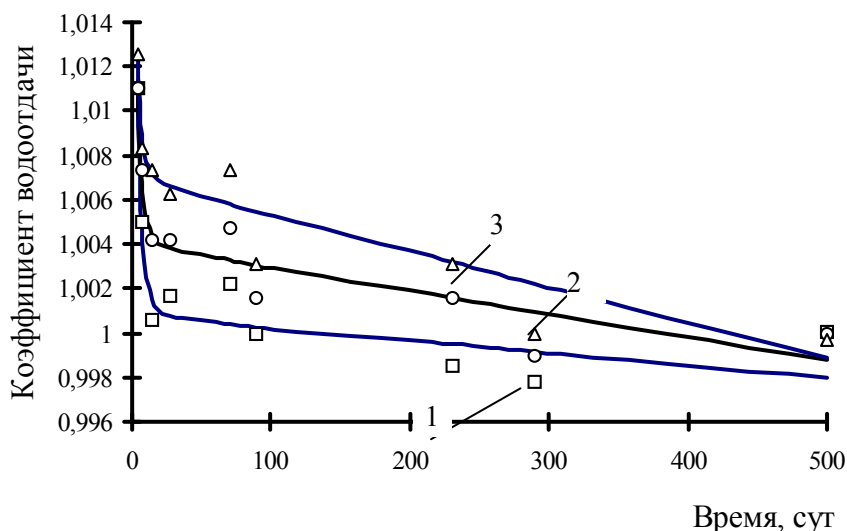


Рис. 4. Зависимость коэффициент водоотдачи от времени экспозиции бетона

На рис. 5 представлены экспериментальные данные и математические зависимости кинетики изменения динамического модуля упругости сравниваемых серий образцов бетона. Из физики твердого тела известно, что на модуль упругости дисперсных систем основное влияние оказывает плотность структуры материала. Введение СП С-3 способствует, как отмечено выше, повышению плотности цементной композиции и увеличению координационных чисел контактного взаимодействия, особенно на уровне тонкодисперсной составляющей цементной композиции, что и приводит к увеличению численных значений модуля упругости в составах, содержащих СП С-3.

Математическая обработка экспериментальных данных, представленных на рис. 5, позволила получить аналитическую зависимость:

$$E_d = \frac{ab + c\tau^d}{b + \tau^d}, \quad (4)$$

где *a*, *b*, *c*, *d* – эмпирические коэффициенты; τ – время наблюдений.

Значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 3.

Из анализа вида и значений эмпирических коэффициентов кинетической зависимости следует, что на формирование структуры и численных значений модуля

упругости оказывают влияние как конструктивные, так и деструктивные процессы, протекающие при длительном твердении бетона. На наш взгляд, числитель этой зависимости характеризует конструктивные, а знаменатель – деструктивные процессы, протекающие в бетоне. Конструктивные процессы обусловлены продолжающейся гидратацией цементных зерен, а деструктивные – возникновением собственных внутренних напряжений. При длительном времени наблюдения за структурообразованием твердеющих дисперсных систем можно констатировать взаимовлияние названных процессов, в результате которого преобладает или конструктивное, или деструктивное начало, что выражается в пилообразном характере изменения механических свойств этих систем. Это подтверждается исследованиями других авторов [6–9].

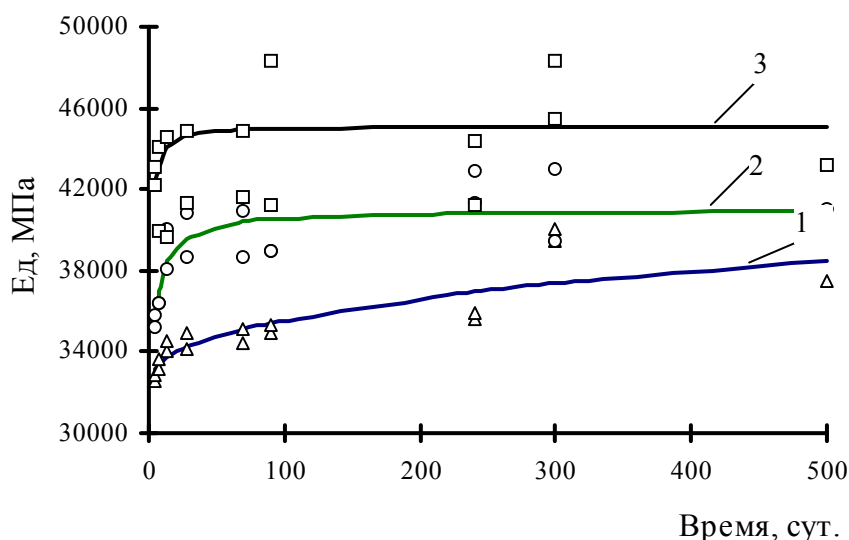


Рис. 5. Зависимость динамического модуля упругости от возраста бетона

Т а б л и ц а 3

Состав бетона	Значения эмпирических коэффициентов			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Состав №1	32416,85	57,018	52980,64	0,5098
Состав №2	29700,564	4,073	41032,56	1,0014
Состав №3	40457,713	10,823	45106,26	1,368

В начальные сроки твердения преобладающим является конструктивный процесс структурообразования, скорость которого может быть определена:

$$\frac{dy_c}{d\tau} = cd\tau^{d-1}. \quad (5)$$

В более длительные сроки наряду с конструктивными начинают развиваться и деструктивные процессы, скорость которых можно выразить формулой

$$\frac{dy_d}{d\tau} = d\tau^{d-1}. \quad (6)$$

Анализ скоростей названных процессов, определенных путем расчета по полученным моделям, свидетельствует о том, что скорости процессов в сравниваемых сериях бетона имеют существенное как качественное, так и количественное различие. Из данных, приведенных в табл. 4, видно, что скорости конструктивного и деструктивного процессов на образцах бетона серии 1 имеют затухающий характер, который можно описать гиперболической функцией. В то же время на образцах бетона серий 2 и 3, приготовленных с использованием СП С-3, скорости этих процессов характеризуются экспоненциальной зависимостью, что, на наш взгляд, обусловлено возникно-

вением стерического фактора, вносимого в конструктивный процесс синтеза прочности цементного камня с химической добавкой.

Т а б л и ц а 4

Состав	Процесс	Скорости процессов в период времени, сутки				
		3	28	100	250	500
Состав №1	Конструктивный	15762,76	5273,758	2825,641	1803,212	1283,754
	Деструктивный	0,297519	0,099541	0,053333	0,034035	0,024231
Состав №2	Конструктивный	41153,25	41282,14	41355,78	41408,87	41449,07
	Деструктивный	1,002941	1,006083	1,007877	1,009171	1,010151
Состав №3	Конструктивный	92449,28	210318,3	335987,3	470722,4	607496,6
	Деструктивный	2,049589	4,66273	7,448796	10,43585	13,46812

На рис. 6 приведены теоретические зависимости динамического модуля упругости от коэффициента внутреннего трения, полученные путем математической обработки экспериментальных данных. Математическая модель этих зависимостей имеет вид:

$$E_d = a + \frac{b}{K_{\text{вт}}}, \quad (7)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Состав бетона	Значения эмпирических коэффициентов	
	a	b
Состав №1	1,0073	$-5,46 \cdot 10^{-6}$
Состав №2	1,0039	$-1,03 \cdot 10^{-5}$
Состав №3	1,0069	$-1,613 \cdot 10^{-5}$

Из графических зависимостей, изображенных на рис. 6, и физической сущности формирования механических свойств цементных композитов прослеживается достаточно четкая взаимосвязь между значениями коэффициентов внутреннего трения и динамического модуля упругости на образцах бетона сравниваемых серий. Однако следует отметить, что применение добавки СП С-3, с одной стороны, приводит к улучшению механической характеристики бетона, а с другой, – к увеличению его внутреннего трения.

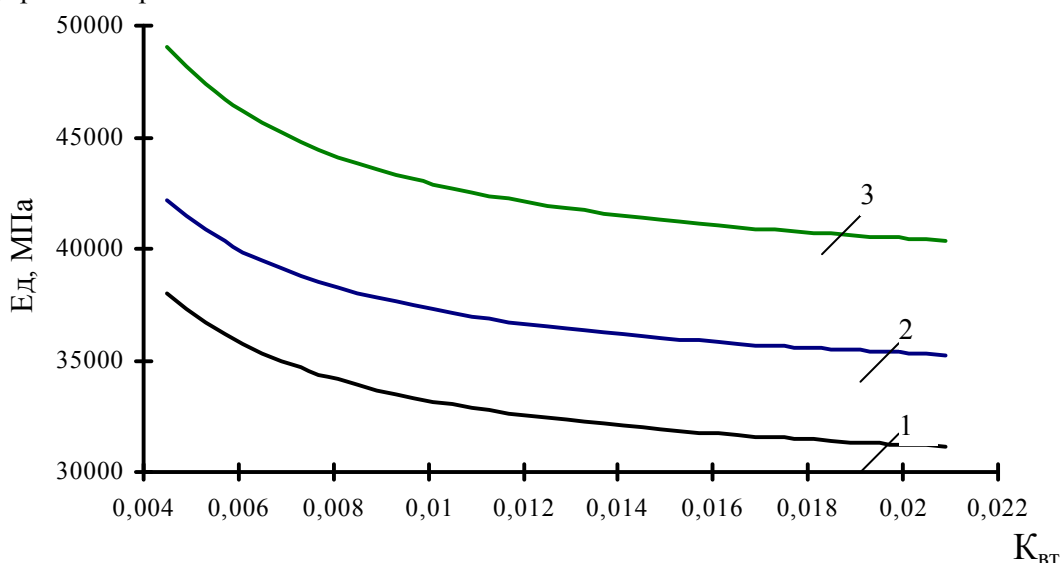


Рис. 6. Корреляционная зависимость динамического модуля упругости от коэффициента внутреннего трения бетона

По результатам испытания опытных образцов в табл. 6 приведены механические характеристики бетонных смесей, прочностные свойства $R_{сж}$ и $R_{ри}$ и параметры структурной механики разрушения – критический коэффициент интенсивности напряжения K_{IC} и критическая интенсивность (скорость) высвобождения энергии G_{IC} сравниваемых серий бетона, а на рис. 7 показаны зависимости энергии акустической эмиссии при нагружении опытных образцов.

Все физико-механические характеристики бетона определяли экспериментальным путем в соответствии с [10–12].

Т а б л и ц а 6

Физико-механические свойства и параметры разрушения конструкционной прочности цементных композитов

Характеристики	Состав бетона		
	№1	№ 2	№ 3
Жесткость бетонной смеси, с	70–80	3–5	30–35
В/Ц	0,306	0,306	0,242
$R_{сж}$, МПа	63,9	76,1	88,4
$R_{ри}$, МПа	6,3	7,9	8,3
E_d , МПа	37770	40250	41800
K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	1,20	1,63	1,72
G_{IC} , Н/м	38,125	66,009	70,775

Таким образом, из экспериментальных результатов, приведенных на рис. 3 и в табл. 6, следует, что применение добавки СП С-3, с одной стороны, приводит к улучшению механических характеристик бетона, а с другой – к увеличению его внутреннего трения, что способствует повышению вязкости разрушения. Для объяснения этих противоположных эффектов действия суперпластификатора С-3 на рассматриваемые свойства бетона следует исходить из представлений о том, что прочность цементного камня и бетона на его основе есть функция пористости, характера надмолекулярной структуры, прочности контактов в тоберморитовом геле, свойств адгезионных контактов, структурного фактора, морфологии гидратных новообразований [7], а внутреннее трение есть функция прежде всего прочности и плотности фазовых контактов в матричной дисперсионной среде композита.

Приведенные на рис. 7 графические зависимости энерговыделения акустической эмиссии (АЭ) дают наглядное представление о зарождении и росте дефектов структуры. Увеличение числа акустических импульсов энергии АЭ на первых двух стадиях носит случайный характер и вызвано развитием отдельных дефектов, размер которых не является критическим для опытного образца.

Переход от второй к третьей стадии акустической активности характеризует наиболее важную смену закономерности изменения наблюдаемого параметра АЭ. Эти узловые участки на кривой энерговыделения АЭ характеризуют переход от стабильного роста дефекта к нестабильному (с позиций синергетики, эти узловые участки соответствуют точкам бифуркации, при достижении которых происходит смена микромеханизма разрушения, скачкообразно изменяются свойства в вершине дефекта, обусловленные самоорганизацией процесса), когда ускоренный рост дефекта протекает еще вязким образом.

Четвертая, закритическая, стадия АЭ характеризуется плотностью энергии, являющейся константой материала и связанной с прочностью межатомной связи, отражает хрупкое катастрофическое разрушение образца. Таким образом, смена закономерностей энерговыделения АЭ на кривой нагружения является важным прогностическим признаком разрушения.

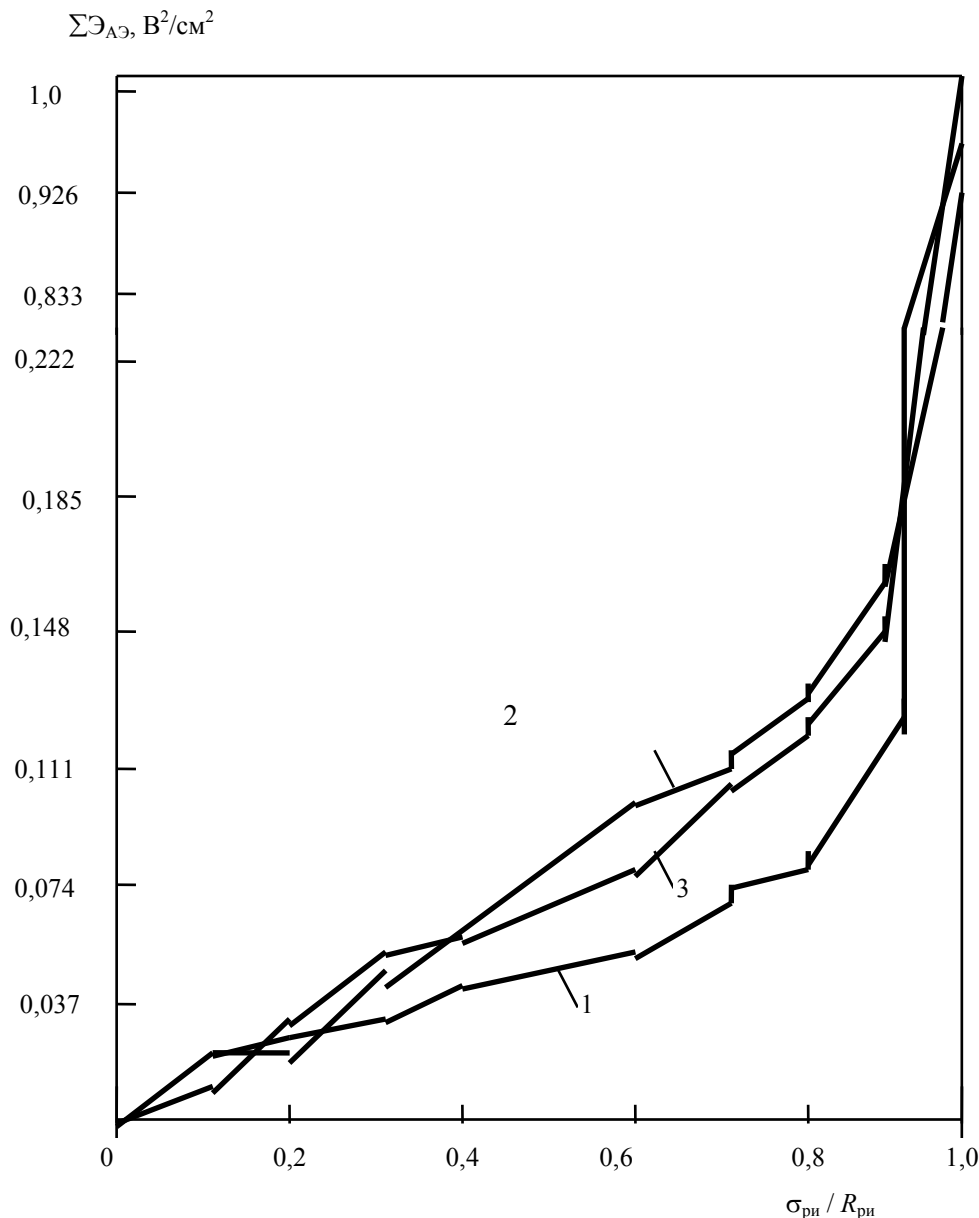


Рис. 7. Зависимость энергии акустической эмиссии $\mathcal{E}_{АЭ}$ от нагрузки при трехточечном изгибе для бетона в возрасте 420 суток

С учетом этих положений, графические зависимости энерговыделения (см. рис. 7) свидетельствуют о более вязком трещиностойком характере разрушения модифицированных бетонов серий 2 и 3, что находится в полном соответствии с численными значениями силового критерия трещиностойкости K_{IC} и критической интенсивности высвобождения энергии G_{IC} (см. табл. 6), критические значения которых дают количественную характеристику сопротивления материала разрушению.

Таким образом, исследования показали, что применение добавки С-3 является эффективным физико-химическим методом воздействия на формирование дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня, определяющей внутреннее трение, прочность и параметры разрушения бетона на его основе. По экспериментальной акустической ветви энерговыделения представляется возможным прогнозировать предразрушающее состояние, судить о степени хрупкости и осуществлять рецептурно-технологическую оптимизацию структуры композитных строительных материалов.

Использованный в исследованиях методологический подход к оценке влияния добавки С-3 на трещиностойкость с помощью методов внутреннего трения и акустической эмиссии открывает новые экспериментальные возможности совершенствования композитной структуры бетона.

Список литературы

1. Макридин, Н.И. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 1 / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Овсяюкова // Строительные материалы. – 2010. – №10. – С. 74–77.
2. Макридин, Н.И. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 2 / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Овсяюкова // Строительные материалы. – 2011. – №7. – С. 72–75.
3. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов : монография / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
4. Мchedlov-Petrosyan, O.P. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мchedlov-Petrosyan. – 2-е изд., перераб. и допол. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
5. Инструкция. Прибор для измерения коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ-2. – Л.: ЛЭТИ, 1967. – 32 с.
6. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
7. Сычев, М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня / М.М. Сычев // Журнал прикладной химии АН СССР. – 1981. – Т. LIV, №9. – С. 2036–2043.
8. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С.А. Миронов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1973. – 95 с.
9. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – №4. – С.25–27.
10. ГОСТ 53231–2008. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М., 2008.
11. ГОСТ 29167–91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М., 1991.
12. Экспериментальное определение физико-механических свойств и параметров механики разрушения ультравысокопрочных бетонов / Н.И. Карпенко, Ю.В. Зайцев, Г.Э. Окольников, А.А. Андрианов // Научные труды РААСН. Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2011 году. – М. – Орел, 2011. – С. 242–248.

References

1. Makridin, N.I. Long-term strength of the modified structure of cement stone. P. 1 / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Yu.V. Ovsyukova // Stroitelnye materialy. – 2010. – №10. – P. 74–77.
2. Makridin, N.I. Long-term strength of the modified structure of cement stone. Part 2 / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Yu.V. Ovsyukova // Stroitelnye materialy. – 2011. – №7. – P. 72–75.
3. Makridin, N.I. Structural formation and structural strength of cement composites: monograph / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.
4. Mchedlov-Petrosyan, O.P. Chemistry of inorganic building materials / O.P. Mchedlov-Petrosyan. – 2 nd edition, revised. and add. – M.: Stroiizdat, 1988. – 304 p.
5. Instruction. The device for measuring the coefficient of internal friction type ICWT-2. – L.: LETI, 1967. – 32 p.
6. Akhverdov, I.N. Fundamentals of concrete physics / I.N. Akhverdov. – M.: Stroiizdat, 1981. – 464 p.

7. Sychev, M.M. Some questions of the chemistry of concrete and cement stone / M.M. Sychev // Journal of Applied Chemistry, USSR Academy of Sciences. – 1981. – V. LIV, No. 9. – P. 2036–2043.
8. Growth of concrete strength during steaming and subsequent hardening / S.A. Mironov [etc.]. – M.: Stroizdat, 1973. – 95 p.
9. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Genius // Concrete and reinforced concrete. – 1995. – №4. – P. 25–27.
10. GOST 53231–2008. Concretes. Rules for monitoring and evaluation of strength. – M., 2008.
11. GOST 29167–91. Concretes. Methods for determining fracture toughness (fracture toughness) under static loading. – M., 1991.
12. Experimental determination of physicommechanical properties and parameters of the mechanics of destruction of ultrahigh-strength concretes / N.I. Karpenko, Yu.V. Zaytsev, G.E. Okolnikova, A.A. Andrianov // Scientific works of RAASN. Fundamental research of RAASN on scientific support of the development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2011. – M. – Orel, 2011. – P. 242–248.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

МЕТОД ПРОБНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Данилов, И.А. Гарькина

Предлагается метод параметрической идентификации кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композиционных материалов. Метод иллюстрируется на примере дифференциальной модели системы второго порядка. Указаны приложения к разработке композиционных материалов различного назначения.

Ключевые слова: композиционные материалы, свойства, формирование, кинетические процессы, параметрическая идентификация, метод пробных воздействий

METHOD OF TRIAL IMPACT IN IDENTIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS

A.M. Danilov, I.A. Garkina

A method of parametric identification of kinetic processes of formation of physical and mechanical characteristics of composite materials is proposed. The method is illustrated by the example of a differential model of a second-order system. The appendices to the development of composite materials for various purposes are indicated.

Keywords: composite materials, properties, formation, kinetic processes, parametric identification, method of trial effects

В соответствии с [1] параметрическая идентификация кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композиционных материалов сводится к изучению системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax};$$

для большинства из них можно ограничиться случаем

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Задача сводится к решению уравнения

$$(p^2 - \sigma p + \Delta)X = 0$$

или

$$(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)X = 0,$$

$$T^2 = \frac{1}{\Delta}, \quad 2\xi T = -\frac{\sigma}{\Delta}, \quad T = \frac{1}{\sqrt{\Delta}}, \quad \xi = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\Delta}}.$$

Пусть $\sigma^2 - 4\Delta > 0$; $\sigma = a_{11} + a_{22}$, $\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, и система аperiодическая. Тогда

$$T^2 p^2 + 2\xi T p + 1 = (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) = T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1.$$

Откуда

$$T_1 T_2 = T^2, \quad T_1 + T_2 = 2\xi T;$$

$$T_1 = \frac{T}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} = T(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}), \quad T_2 = \frac{T}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} = T(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}).$$

При этом корни характеристического уравнения будут равны:

$$\lambda_1 = -\frac{1}{T_2}, \quad \lambda_2 = -\frac{1}{T_1}; \quad 0 < T_1 < T_2.$$

Решение уравнения $(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)X = 0$ имеет вид

$$x(t) = A e^{-\frac{1}{T_2}t} + B e^{-\frac{1}{T_1}t}$$

При начальных условиях (пробные воздействия) $x(0) = x_0, \dot{x}(0) = 0$ имеем

$$x_0 = A + B;$$

$$0 = -\frac{1}{T_2}A - \frac{1}{T_1}B = -\frac{T_1 A + T_2 B}{T_1 T_2}.$$

Откуда

$$A = \frac{T_2}{T_2 - T_1} x_0 > 0, \quad B = \frac{T_1}{T_2 - T_1} x_0 < 0.$$

Без ограничения общности можно положить $x_0 = 1$.

Справедливо

$$x(t) = \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} = y_1(t) - y_2(t);$$

$$x(t) = \frac{m}{(m-1)} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{(m-1)} e^{-\frac{t}{T_1}} = y_1(t) - y_2(t); \quad m = \frac{T_2}{T_1}.$$

Функция $x(t)$ монотонно убывающая, так как при $t > 0$

$$\dot{x}(t) = -\frac{m}{(m-1)T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{1}{(m-1)T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} = \frac{1}{(m-1)T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) < 0$$

в силу $e^{-\frac{t}{T_1}} < e^{-\frac{t}{T_2}}$.

Имеем

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{(m-1)T_1} \left(\frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} \right).$$

Для точки перегиба (t_n - параметр оптимизации) $\ddot{x}(t_n) = 0$

$$\frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_n}{T_2}} = \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_n}{T_1}},$$

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\frac{t_n}{T_1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = e^{\frac{t_n}{T_2} \left(\frac{m-1}{T_2} \right)}, \quad m = e^{\frac{t_n}{T_2} \left(\frac{m-1}{T_2} \right)}, \quad t_n = T_2 \frac{\ln m}{m-1} = T_2 \ln(m)^{\frac{1}{m-1}}.$$

Значение t_n , определенное по графику, можно использовать для контроля или для приближенного вычисления m :

$$\ln(m)^{\frac{1}{m-1}} = \frac{t_n}{T_2}, \quad (m)^{\frac{1}{m-1}} = e^{\frac{t_n}{T_2}}.$$

Отметим также, что при всех $t > 0$

$$y_1(t) > y_2(t)$$

$$(t > 0; \frac{m}{m-1} > \frac{1}{m-1}; m > 1: e^{-\frac{t_n}{T_2}} > e^{-\frac{t_n}{T_1}}; T_2 > T_1).$$

Найдем значение $t = t_k$, при котором $\frac{y_1(0)}{y_1(t_k)} = k_1, \frac{y_2(0)}{y_2(t_k)} = k_2, \frac{x(0)}{x(t_k)} = k$.

Имеем

$$y_1(t_k) = \frac{m}{m-1} e^{-\frac{t_k}{T_2}}, \quad y(0) = \frac{m}{m-1}.$$

Отсюда

$$k_1 = e^{\frac{t_k}{T_2}}, \quad \frac{t_k}{T_2} = \ln k_1, \quad t_k = T_2 \ln k_1.$$

Из соотношения k_2 получим:

$$k_2 = \frac{1}{m-1} : \frac{1}{m-1} e^{-\frac{T_2 \ln k_1}{T_1}} = e^{-m \ln k_1} = e^{\ln k_1^{-m}} = k_1^{-m} = \frac{1}{k_1^m}.$$

Таким образом, $k_2 = \frac{1}{k_1^m}$. Определим k через k_1 .

Имеем

$$k = \frac{1}{\frac{1}{m-1} (m e^{-\ln k_1} - e^{-m \ln k_1})} = \frac{1}{(m-1) (m e^{\ln k_1^{-1}} - e^{\ln k_1^{-m}})}; \quad k = \frac{m-1}{\frac{m}{k_1} - \frac{1}{k_1^m}}.$$

Определим $\frac{y_2(t)}{y_1(t)}$.

Имеем

$$\frac{y_2(t)}{y_1(t)} = \frac{\frac{1}{m-1} e^{-\frac{t}{T_1}}}{\frac{m}{m-1} e^{-\frac{t}{T_2}}} = \frac{1}{m} e^{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) t} < 1$$

для всех t , так как $T_2 > T_1, \frac{1}{m} < 1$.

Определим значение $t = t_{21}$, при котором $\frac{y_2}{y_1} = \frac{\beta}{100}$.

В силу того, что $\frac{y_2(t)}{y_1(t)}$ - монотонно убывающая функция, ибо

$$\left(\frac{y_2(t)}{y_1(t)} \right)' = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) e^{-\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) t} < 0,$$

то при $t \geq t_{21}$

$$\frac{y_2}{y_1} \leq \frac{\beta}{100}.$$

Тогда при $t \geq t_{21}$ с точностью β %

$$x_1(t) = y_1(t).$$

Определим t_{21} . При $t \geq t_{21}$

$$\begin{aligned} \frac{y_2}{y_1} &= \frac{1}{m} e^{\left(-\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) t_{21}} \leq \frac{\beta}{100}, \\ \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) t_{21} &\leq \ln \frac{m\beta}{100}, \quad t_{21} \leq \frac{T_2}{1-m} \ln \frac{m\beta}{100}. \end{aligned}$$

При $t = t_{21}$

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{1-m} \ln \frac{m\beta}{100} &= T_2 \ln k_1 \\ \ln \left(\frac{m\beta}{100} \right)^{\frac{1}{1-m}} &= \ln k_1, \quad k_1 = k_1(t_{21}) = \left(\frac{m\beta}{100} \right)^{\frac{1}{1-m}}. \end{aligned}$$

При значении $t_{21} = \frac{T_2}{1-m} \ln \frac{m\beta}{100}$, $k_1 = k_1(t_{21})$ и после $t = t_{21}$ можно $y_2(t)$ пренебречь с точностью β %.

В силу $x_1(t) \approx y_1(t)$ при $t \geq t_{21}$:

$$k = \frac{x_1(0)}{y_1(t_{21})} = \frac{m-1}{m} e^{\ln \left(\frac{m\beta}{100} \right)^{\frac{1}{1-m}}} = \frac{m-1}{m} \left(\frac{m\beta}{100} \right)^{\frac{1}{1-m}}.$$

Таким образом,

$$k(t_{21}) \approx \frac{m-1}{m} \left(\frac{m\beta}{100} \right)^{\frac{1}{1-m}}.$$

Истинное значение $k(t_{21})$ найдется по формуле

$$k(t_{21}) = \frac{m-1}{m \left(\frac{100}{m\beta} \right)^{\frac{1}{1-m}} - \left(\frac{100}{m\beta} \right)^{\frac{1}{1-m}}}.$$

Для определения T_2 рассмотрим конец переходного процесса $x(t)$.

Здесь $x(t)$, по существу, является решением уравнения

$$(T_2 p + 1)x = 0$$

и имеет вид

$$x(t) = ce^{-\frac{t}{T_2}};$$

с определится из начального условия $x(0) = x(t_k)$, $c = x(0)$.

Имеем

$$\frac{x(0)}{x(t_k + T)} = k_T = \frac{x(0)}{x(0)e^{-\frac{1}{T_2}T}} = e^{\frac{T}{T_2}}.$$

Тогда

$$T_2 = \frac{T}{\ln k_T}.$$

Если известен переходный (кинетический) процесс, то при выбранном t_k будем

$$\text{иметь: } k = \frac{x(0)}{x(t_k)}; \ln k_1 = \frac{t_k}{T_2}, T_2 = \frac{\ln k_T}{T}.$$

Зная k_1 , из

$$k = \frac{m-1}{\frac{m}{k_1} - \frac{1}{k_1^m}}$$

определим m , а далее и второй искомый параметр оптимизации $T_1 = \frac{T_2}{m}$.

Возможность использования приведенного метода идентификации оценивалась на примере системы с $T_1 = 0,5$, $T_2 = 1$; $m = 2$. Здесь точное решение имеет вид

$$x(t) = 2e^{-t} - e^{-2t}.$$

Численные значения $x(t_k)$ представлены в таблице:

t	0	0,1	0,25	0,5	1	2	2,5	3	4	5	3,3
$y_1 = 2e^{-t}$	2	1,8	1,55	1,2	0,74	0,27	0,164	0,1	0,037	0,013	0,074
$y_2 = e^{-2t}$	1	0,82	0,61	0,37	0,14	0,018	0,0007	0,0025	0,00034	0,00004	0,0014
x_k	1	0,98	0,94	0,83	0,6	0,25	0,16	0,098	0,037	0,013	0,063

Приведем соответствующие оценки значений T_1 и T_2 , установленных по численным значениям x_k .

$$\text{Так, при } t_k = 2 \text{ имеем: } T = 3 - 2 = 1, k_T = \frac{0,25}{0,1} = 2,5, T_2 = \frac{T}{\ln k_T} = \frac{1}{\ln 2,5} = 1,09.$$

Постоянная времени T_2 определилась с относительной ошибкой $\frac{1,09-1}{1,09} \cdot 100\% = 8\%$.

Можно показать, что относительная ошибка определения T_1 не превышает 20 %.

Имеем $\beta \leq \frac{100\%}{2,73} e^{\frac{1-2,73}{1,09} \cdot 2} = 1,5\%$; истинное значение

$$\beta = \frac{y_2(2)}{y_1(2)} 100\% = 6,7\%.$$

Справедливо

$$T = \sqrt{T_1 T_2} = \sqrt{1,09 \cdot 0,4} = 0,66;$$

$$\xi = \frac{T_1 + T_2}{2T} = 1,13;$$

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,66} = 1,52;$$

$$\Delta = \frac{1}{T^2} = \frac{1}{0,66} = 2,29; \quad \sigma = -2\xi T \Delta = -3,42.$$

Откуда

$$a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 2,29;$$

$$a_{11} + a_{22} = -3,42.$$

Из последних уравнений могут быть найдены два из коэффициентов a_{ij} при двух заданных. Если по виду кинетического процесса легко определить точку перегиба t_n , то для вычисления m лучше использовать формулу

$$(m)^{\frac{1}{m-1}} = e^{\frac{t_n}{T_2}}.$$

Пусть теперь одновременно с $x(t)$ регистрируется $\dot{x}(t)$. Необходимое условие экстремума $\dot{x}(t)$ дает $\ddot{x}(t) = 0$, то есть экстремум возможен при $t = t_n = T_2 \ln(m)^{\frac{1}{m-1}}$.

Так как

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{(m-1)T_1 T_2^2} \left(m^2 e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) < 0$$

в силу $m > 1$, $e^{-\frac{t}{T_1}} < e^{-\frac{t}{T_2}}$, то $\dot{x}(t)$ достигает максимума при $t = t_n$.

Так как $\dot{x}(0) = 0$, $\dot{x}(\infty) = 0$, то определение t_n по графику $\dot{x}(t)$ не представляет затруднений. Поэтому при наличии реализаций $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ определение m лучше проводить по формуле

$$(m)^{\frac{1}{m-1}} = e^{\frac{t_n}{T_2}}.$$

Предложенный подход эффективно использовался при настройке моделей кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композиционных материалов различного назначения [2...6].

Список литературы

1. Garkina, I. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A.Garkina, A.M.Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.191.

3. Korolev, E.V. Using Particle Systems to Model the Building Materials / E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 746. – P. 277–280.
4. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
5. Данилов, А.М. Композиты: графоаналитический метод параметрической идентификации кинетических процессов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. – №2. – С.45–52.
6. Воробьев, В.А. Основные задачи компьютерного материаловедения строительных композитов / В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // *Строительные материалы*. – 2006. – № 7. – С.19–21.

References

1. Garkina, I. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A.Garkina, A.M.Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V.191.
3. Korolev, E.V. Using Particle Systems to Model the Building Materials / E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 746. – P. 277–280.
4. Systems analysis in building materials: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: Moscow State University of Civil Engineering: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
5. Danilov, A.M. Composites: graph-analytical method of parametric identification of kinetic processes / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and construction*. – 2017. – №2. – P. 45–52.
6. Vorobyev, V.A. The main tasks in computer study of building materials / V.A. Vorobyev, A.V. Iluhin // *Building Materials*. – 2006. – № 7. – P.19–21.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Снадин Евгений Валерьевич,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов и
деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Snadin Evgeny Valerevich,
Postgraduate of the department «Technology
of building materials and wood processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

ОБЛЕГЧЕННАЯ КЕРАМИКА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Береговой, Е. В. Снадин

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению физико-механических показателей теплоэффективной керамики плотностью 1000...1200 кг/м³ для стеновых ограждающих конструкций. Установлено позитивное влияние введения флюсующих стеклосодержащих добавок на деформационные и прочностные характеристики кремнистой керамики, а также ее водостойкость.

Ключевые слова: стеновая керамика, исследование свойств, подбор состава, расширение сырьевой базы

LIGHTWEIGHT CERAMIC WITH INCREASED STRENGTH FOR ENERGY EFFICIENT WALLS STRUCTURES

V.A. Beregovoi, E.V. Snadin

The results of experimental research on determination physical and mechanical properties of ceramics with density 1000...1200 kg/m³ for the wall structures are given. Positive effect of introduction of glass-fluxing additives on deformation and strength properties of siliceous ceramics and water resistance is determined.

Keywords: wall ceramics, study of properties, selection, expanding the raw material base

В основе существующих технологий производства строительной керамики лежит использование пластичного сырья в виде легкоплавких глин смешанного минералогического состава (каолинито-монтмориллонитовых, галлузитов-монтмориллонитовых и т.п.). Применение альтернативных сырьевых ресурсов, например органогенных кремнеземистых пород, в керамической промышленности весьма ограничено. В новых стандартах появилось указание на отдельные породы из этой группы (трепел, диатомит) как на возможный сырьевой источник для производства керамики, однако опока в этом качестве не обозначена [1]. Это резко сужает минерально-сырьевую базу для производства кремнистых разновидностей стеновой керамики, поскольку во многих регионах страны природные опоки распространены более широко.

В ряде опубликованных работ было показано, что правильное использование технологических особенностей опочного сырья позволяет достичь уровня показателей свойств, характерных для теплоэффективной стеновой керамики [2]. Дальнейшее повышение качества такой керамики может быть достигнуто за счет улучшения

процесса спекания кремнеземистых частиц, составляющих основу несущей матрицы, при умеренном повышении микропористости материала. В результате снизится энергоёмкость процесса изготовления, поскольку современный уровень развития технологий в области обжиговых печей обеспечивает экономию топливных ресурсов примерно на 5...7 % при уменьшении средней плотности керамических изделий на 10 %.

Технологическими факторами, влияющими на процесс образования прочного керамического конгломерата, являются размер взаимодействующих частиц, водотвердое отношение сырьевой смеси и наличие в ней флюсующих добавок. В качестве добавок, обеспечивающих ускорение процесса образования легкоплавких эвтектик, использовали готовые затравки процесса плавления – тонкомолотые стекла различного оксидного состава в количестве 8...10 %.

Продолжительность процесса формирования мест срастания стекловидной и кристаллической фаз при обжиге кремнистой керамики выражается уравнением [3]:

$$\tau_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^\gamma \cdot \tau_1, \quad (1)$$

где τ_2 – время спекания частиц размером r_2 ; τ_1 – время спекания частиц размером r_1 ; γ – коэффициент, зависящий от типа механизма спекания (при вязком течении он равен 1).

Влияние средней плотности и степени спекания на прочность керамического материала характеризуют экспериментальные данные, приведенные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость прочности от средней плотности кремнистой опочной керамики

Ср. плотность ρ_m , кг/м ³	400...450	450...500	...	1100...1150	1200...1220*	1300
$R_{сж}^{обж}$, МПа	1,4...1,6	3,0...3,2	...	10,0...10,5	19,5...20,0	30

* С модифицирующей добавкой на основе стекла.

Керамика с плотностью 4000...500 кг/м³ была получена методом вибровспенивания кремнистого шликера с последующим обжигом ячеистого сырца.

Для разработанной керамики зависимость прочности на сжатие от средней плотности имеет вид:

$$R_{сж}^{пор} = R_{сж}^{max} \cdot \left(\frac{\rho_m^{факт}}{\rho_m^{max}} \right)^k, \quad (2)$$

где $R_{сж}^{max}$ – максимальная прочность, характерная для хорошо спекшегося черепка (≈ 30 МПа); $\rho_m^{факт}$ и ρ_m^{max} – фактическая и максимально достижимая средняя плотность испытываемого состава керамики ($\rho_m^{max} = 1300...1350$ кг/м³); k – структурный коэффициент, учитывающий качество пористой структуры ($k \approx 2$).

При проведении исследований использовали местные разновидности – сурские опоки. В состав горной породы, наряду с кварцем, опаловидным кремнеземом и кристобалитом, входят также сепиолито-монтмориллонитовые глины (5...15 %) [4].

Образцы керамики для проведения испытаний готовили следующим образом: отформованный сырец высушивали в комнатных условиях, а затем обжигали при максимальной температуре 900...930 °С в течение 3...4 часов. Общая продолжительность процесса «нагревание-обжиг-охлаждение» составляла от 8 до 10 часов.

На образование хорошо обожженного кремнистого черепка указывают внешний вид, а также характер разрушения контрольных образцов, проявившийся в ходе проведения механических испытаний (см. фото).



Механические испытания разработанной опочной керамики

Для изучения упругопластичных свойств были получены диаграммы нагружения кремнистой керамики в координатах « σ – ε » (рис. 1).

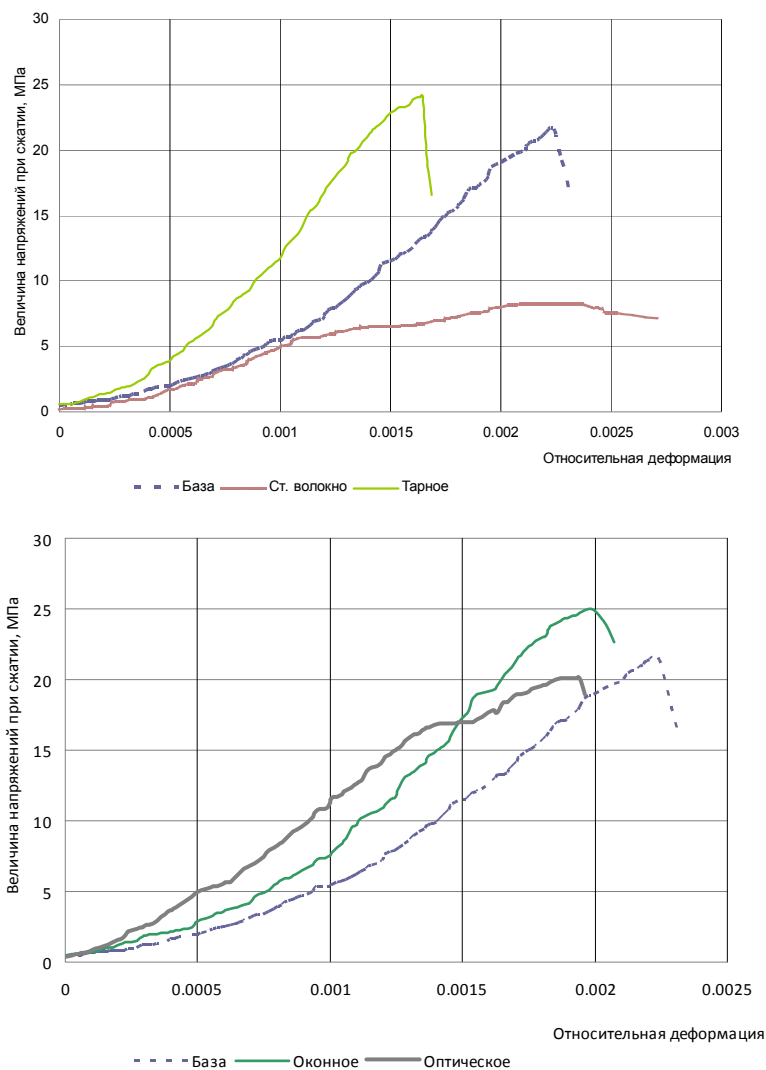


Рис. 1. Диаграммы нагружения опочной керамики базового состава и с добавлением тонкомолотого стекла

На рис. 2 показано влияние вида флюсующей добавки на величину модуля упругости материала в сухом и увлажненном состоянии.

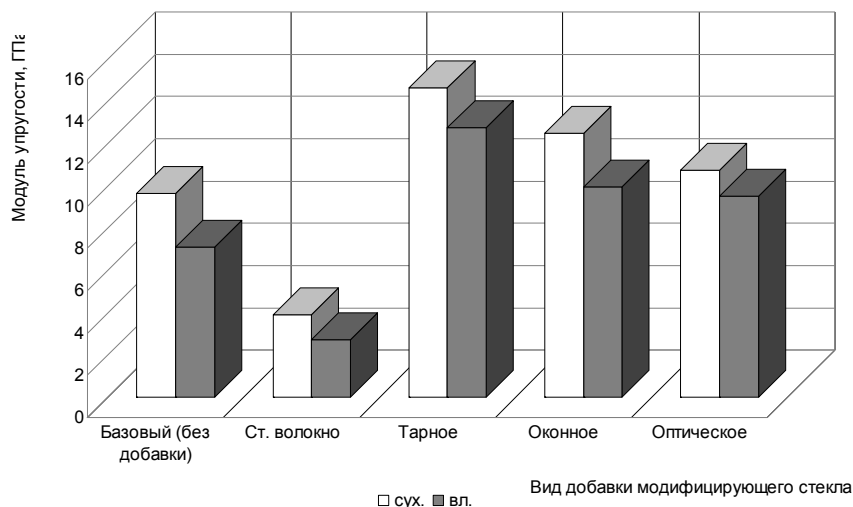


Рис. 2. Модуль упругости керамики: влияние вида модифицирующего стекла

Результаты испытаний опочного сырца и керамики приведены в табл. 2 и 3.

Т а б л и ц а 2

Состав и свойства опочного сырца

Номер состава	Содержание компонентов, (%)	ρ_m , кг/м ³	Усадка воздушная, %	$R_{сж}$, МПа
1 (базовый)	Опока (99 %), Na ₂ CO ₃ (1 %), В/Т=0,5	1167	5,3	3,1
2	Базовый + стекловолокно (5 %)	1059	2,6	2,8
3	Базовый + порошок тарного стекла (10 %)	1192	5,25	2,25
4	Базовый + порошок оконного стекла (10 %)	1211	5,15	2,67
5	Базовый + порошок оптического стекла (10 %)	1174	4,6	1,88

Т а б л и ц а 3

Свойства кремнистой керамики

Состав (по табл.2)	ρ_m , кг/м ³	Усадка, %		$R_{сж}$, МПа		$R_{изг}$, МПа		$K_{вод}$	W_m , %
		огневая	общая	сухой	влажный	сухой	влажный		
1	1200	2,53	7,7	19,5	17,5	6,0	5,31	0,90	42,4
2	1050	3,19	5,9	8,21	8,0	3,5	3,08	0,97	44,4
3	1215	3,83	8,45	24,2	20,2	6,7	6,22	0,83	36,8
4	1216	3,15	8,15	24,9	20,8	6,5	6,03	0,83	35,7
5	1224	3,41	7,85	20,9	19,3	4,6	3,68	0,92	37,8

Анализ полученных результатов показывает, что средняя плотность кремнистого черепка существенно меньше по сравнению с керамическим аналогом и достигает минимальных значений 1050...1080 кг/м³. Это позволяет классифицировать вновь разработанный материал как керамическое изделие с повышенной теплотехнической характеристикой [4]. Разработанная керамика характеризуется пониженной теплопроводностью – от 0,20 до 0,24 Вт/(м·°C), а наличие в фазовом составе развитой стекло-

видной составляющей повышает теплозащитные качества стеновых конструкций. В исследованиях [5] было установлено существенное позитивное влияние (эффект) введения тяжелых видов оптического стекла на общую теплопроводность композиционных материалов для защиты от радиации.

Согласно ГОСТ [4] разработанная керамика может быть классифицирована как обжиговый материал повышенной прочности марок М200(250) при плотности, не превышающей 1200...1225 кг/м³. С позиции системного подхода к проектированию составов [6] сочетание высокой прочности и облегченной структуры положительно сказывается на коэффициенте конструктивного качества материала (ККК), показывающем эффективность его применения в несущих конструкциях (рис. 3).

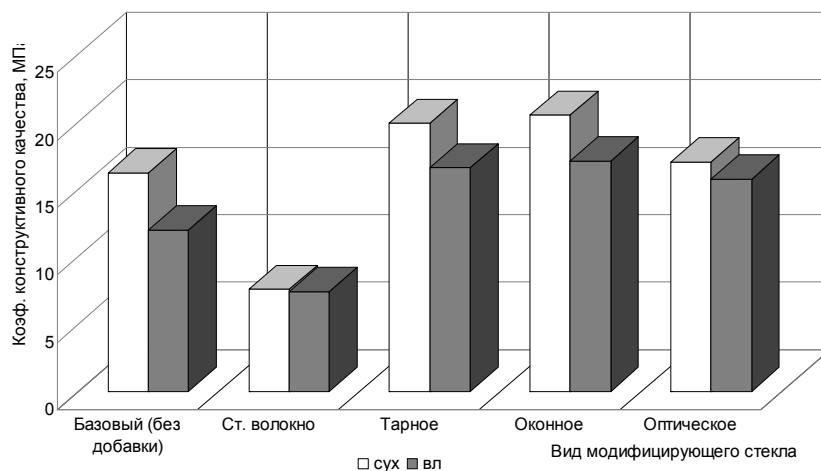


Рис. 3. Величина коэффициента конструктивного качества керамики

Снижение плотности опочной керамики на 35...40 % относительно традиционного полнотелого кирпича, имеющего плотность 1600...1700 кг/м³, закономерно отражается на увеличении водопоглощения до 32...44 %. В новой редакции государственного стандарта максимальное значение этого показателя не нормируется. Ранее (в старой редакции ГОСТ) такое ограничение было: для диатомитового и трепельного изделий оно составляло 28 %.

Выводы. Установлена возможность получения облегченной керамики повышенной прочности (М250) на основе нетрадиционного минерального сырья – непластичных кремнеземистых пород (опок).

Введение в состав сырьевой смеси 10 % боя тарного или оконного стекла позволяет увеличить прочность керамики по сравнению с базовым составом на 20 % и снизить водопоглощение до 35 %.

Несмотря на более низкий диапазон температур плавления, введение порошка оптического стекла практически не оказывает влияния на рост прочности, однако степень спекания материала увеличивается (на это указывает повышение плотности черепка). Таким образом, при корректировке составов кремнистой керамики необходимо учитывать не только термопластичные свойства стекла, но и собственную прочность стекловидной связки, формируемой при последующем охлаждении.

Список литературы

1. ГОСТ 530–2012. Кирпич и камни керамические. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 44 с.
2. Котляр, В.Д. Опоки – перспективное сырье для стеновой керамики / В.Д. Котляр, Б.В. Талпа // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 31–33.
3. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К.К. Стрелов. – М.: Metallurgy, 1985. – 480 с.

4. Береговой, В.А. Стеклокристаллические материалы на основе кремнистых пород / В.А. Береговой, Д.С. Сорокин //Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 54–57.
5. Береговой, В.А. Теплофизические свойства композиционных материалов для защиты от радиации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.А. Береговой. – Пенза, 1997.
6. Гарькина, И.А. Математическое и компьютерное моделирование при синтезе строительных композитов: состояние и перспективы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев //Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 9–13.

References

1. GOST 530–2012. Brick and ceramic stones. General technical conditions. – М.: Standartinform, 2013. – 44 p.
2. Kotlyar, V.D. Gaize – promising raw material for wall ceramics / V.D. Kotlyar, B.V. Talpa // Building materials. – 2007. – No. 2. – P. 31–33.
3. Strelow, K.K. Theoretical bases of technology of refractory materials / K.K. Strelow, M. Metallurgy, 1985. – 480 p.
4. Beregovoi, V.A. Glass-crystal materials on the base of flask rock / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin //Regional architecture and engineering. – 2015. – № 1. – P. 54–57.
5. Beregovoy, V.A. Thermophysical properties of composite materials for radiation protection: the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences: 05.23.05 / V.A. Beregovoi. – Penza, 1997.
6. Garkina, I.A. Mathematical modeling and simulation at building materials synthesis: state and perspectives / I.A. Garkina, A.M., Danilov E.V. Korolev //Regional architecture and engineering. – 2010. – № 2. – P. 9–13.

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

*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

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИНЕРАЛЬНЫМИ И КОМПЛЕКСНЫМИ ДОБАВКАМИ

О.В. Тараканов, Е.А. Белякова

Выявлено влияние тонкодисперсных минеральных и комплексных добавок на структуру и свойства цементно-минеральных материалов. Показано, что их наличие отражается не только на процессах структурообразования, но и на фазовом составе продуктов гидратации цементно-минеральных систем. В работе исследовались свойства бетона, изготовленного на основе тонкодисперсного кальцита. Определено, что повышение прочности цементных материалов с добавкой кальцита может быть объяснено формированием в цементной системе гидросиликатов кальция различного строения. Показано, что зависимость физико-механических и эксплуатационных свойства бетона от количества и природы минеральных и комплексных добавок носит линейный характер.

Ключевые слова: цементно-минеральные смеси, микроструктура, комплексные добавки, прочность, формирование

FORMATION OF MICROSTRUCTURE OF CEMENT MATERIALS WITH MINERAL AND COMPLEX ADDITIVES

О.В. Tarakanov, Е.А. Belyakova

The influence of finely dispersed mineral and complex additives on the structure and properties of cement-mineral materials has been revealed. It is shown that their presence is reflected in the structure formation processes and phase composition of cement-mineral systems hydration products. The properties of concrete made on the basis of finely dispersed calcite were studied. It is determined that an increase of strength of cement materials with addition of calcite can be explained by the formation of calcium hydrosilicates of various structures in cement system. It is shown that the dependence of physical, mechanical and operational properties of concrete on the quantity and nature of mineral and complex additives is linear.

Keywords: cement-mineral mixtures, microstructure, complex additives, strength, formation

В настоящее время широко используются минеральные добавки и комплексные смеси на основе минеральных микронаполнителей и суперпластификаторов. Основное внимание как исследователи, так и работники производственной сферы уделяют вопросам формирования прочности, кинетики твердения и некоторым эксплуатационным показателям.

Однако хорошо известно, что формирование основных свойств цементных бетонов определяется микроструктурой цементного камня, начиная с ранних этапов образования конденсационных контактов и заканчивая образованием кристаллизационных структур. В трудах отечественных и зарубежных ученых отмечается, что формирование кристаллизационной структуры не ограничено периодом 28 дней и даже длительными (1–3 года) сроками и имеет более продолжительный период. Это связано с тем, что структура цементного камня постоянно переходит из одного состояния в другое, зависящие от внешних условий и условий эксплуатации бетона.

Известно (Тейлор), что формирующиеся в начальный период метостабильные гидроалюминатные AFm- и AFt-структуры содержат значительное количество молекул воды (C_4AH_{13} , C_4AH_{19} , C_2AH_8 , CAH_{10} , эттрингит и др.). В процессе твердения эти структуры переходят в наиболее термодинамически устойчивые фазы C_3AH_6 и моногидросульфалюминат кальция. Это сопровождается периодическим уплотнением и разуплотнением структуры вследствие того, что плотности различных гидроалюминатных структур имеют существенное различие. Например, плотность фазы CAH_{10} составляет 1730 кг/м^3 , а плотность C_3AH_6 – 2530 кг/м^3 . Кроме того, в процессе твердения и вследствие перекристаллизации одних структур в другие протекают процессы вторичной и последующей гидратации благодаря высвобождению гидратной воды.

Однако в практике достаточно широко известны случаи, когда гидроалюминаты кальция AFm- и AFt-фаз в течение длительного времени остаются в структуре цементного камня. Так, в работе [1] отмечается, что в цементном камне с добавкой суперпластификатора (СП) по данным рентгенофазового анализа AFm-фазы и эттрингит сохраняются в течение 18 лет.

Здесь следует остановиться на другом очень важном аспекте анализа микроструктуры цементного камня с добавками СП. В работе [2] показано, что практически все пластифицирующие добавки и СП способствуют стабилизации метастабильных гидроалюминатных фаз. Это происходит вследствие поляризационного влияния функциональных групп пластификаторов на состояние межслоевой воды AFm- и AFt-фаз, затрудняющего высвобождение молекул воды и переход гидроалюминатов кальция в наиболее термодинамически устойчивые фазы.

Рассматривая влияние процессов перекристаллизации гидроалюминатных фаз, следует отметить, что малое количество C_3A и C_4AF в составе цемента по сравнению с силикатными фазами в целом не может существенно повлиять на прочность цементного камня и бетона, однако подобные процессы способствуют созданию внутренних напряжений, разуплотнению и расшатыванию структуры, что, в свою очередь, проявляется в так называемом «пилообразном» профиле графика (кинетики) набора прочности в течение длительного периода – 15–20 лет [3].

Хорошо известно замедляющее действие пластифицирующих добавок на гидратацию C_3S и C_2S . Механизмы замедления достаточно описаны в литературе и объясняются главным образом адсорбционными процессами. Для большинства современных суперпластификаторов, способствующих значительному водопонижению, в цементных системах достигается значительное повышение прочности, и эффект замедления за счет снижения В/Ц значительно перекрывается. Однако при детальном анализе влияния СП на состав продуктов гидратации силикатных фаз и цемента проявляется явная тенденция замедления гидратационных процессов для силикатных фаз цемента [2, 4].

Таким образом, очевидна необходимость более тщательного анализа характера влияния модифицирующих добавок на формирование микроструктуры цементного камня и бетона.

В настоящее время в технологии бетона и практике применения минеральных добавок используются в основном микрокремнезем, метакаолин и золы. Применение же других минеральных микронаполнителей достаточно ограничено. Вместе с тем одним из основных положений теории и практики высокопрочных бетонов нового поколения В.И. Калашникова и общей методологии, разработанной им, является возможность создание реологической матрицы, способствующей в присутствии СП

значительному водопонижению цементно-минеральной смеси и, как следствие, резкому повышению прочности, плотности и других эксплуатационных характеристик бетона [5–7].

Для создания реологической матрицы и повышения эффективности суперпластификаторов целесообразно использовать тонкодисперсные минеральные порошки (каменную муку) прочных и плотных горных пород.

Таким образом, анализ литературных источников и результатов практического использования минеральных микронаполнителей в технологии бетонов показал, что тонкомолотые горные породы, в том числе отходы камнедробления, несмотря на огромную проблему их накопления и утилизации, не находят широкого применения в производстве бетонов. Вполне очевидно, что эта проблема связана с малой степенью изученности их влияния не только на реологическую активность в цементных системах, но и на характер кристаллизационных процессов, кинетику структурообразования и основные физико-механические свойства цементных систем.

Кроме того, малоизученными остаются вопросы характера реологического поведения горных пород в бинарных цементно-минеральных системах, когда в присутствии гидратной извести вследствие изменения зарядового состояния частиц микронаполнителя может изменяться и характер влияния минеральных микронаполнителей на реологическое поведение цементно-минеральных систем и эффективность разжижающего влияния СП в смешанных системах. Известно, например [8], что молотый кварцевый песок и микрокремнезем не являются реологически активными по отношению к СП, но в смеси с цементом характер их реологического поведения существенно изменяется.

Другой важнейшей задачей является исследование характера влияния минеральных горных пород на процессы структурообразования и фазовый состав продуктов гидратации цементно-минеральных систем, поскольку формирование кристаллизационной структуры цементных систем, её развитие и изменение в процессе твердения во многом определяют основные свойства бетона.

Задачей исследований явилось изучение реологической активности тонкомолотых минеральных микронаполнителей на эффективность пластифицирующего действия суперпластификаторов. Разжижающее влияние СП определяли по диаметру расплыва цементных, минеральных и цементно-минеральных смесей с помощью микровискозиметра Суттарда. В качестве микронаполнителей использовалась каменная мука, приготовленная помолом гранита, песчаника, опоки и диатомита.

На первом этапе исследовалось разжижающее влияние СП на мономинеральные системы и цемент. Результаты исследований, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что наибольшему разжижающему влиянию СП подвержена гранитная каменная мука (ГМ), причем в большинстве случаев в интервале дозировок 0,5–1 % от массы цемента ГМ пластифицируется лучше, чем цемент. Значительно меньшему влиянию СП подвержена каменная мука на основе песчаника. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что эффективность разжижающего действия СП в минеральных системах определяется главным образом зарядовым состоянием поверхности частиц. Поверхность молотого песчаника практически на 100 % заряжена отрицательно, вследствие чего и адсорбция СП на подобных частицах затруднена, и, естественно, эффективность СП значительно снижается. Поверхность молотого гранита, лишь на 40–50 % состоящая из частиц кварца, заряжена мозаично, что и обеспечивает высокую адсорбционную активность молекул СП и, следовательно, высокое пластифицирующее действие.

Следует отметить, что в процессе помола минеральных наполнителей на поверхности частиц появляются дефекты за счет разрыва ионных или ковалентных связей усиливающих как физическую, электростатическую, так и химическую адсорбцию [8]. Адсорбция влияет на формирование и последующее развитие кристаллизационных контактов, количество которых в цементных системах с тонкомолотыми микронаполнителями значительно возрастает, особенно на активных поверхностях. Частицы цемента также имеют мозаично-заряженную поверхность,

поэтому также как и гранитная мука хорошо разжижаются СП. Однако, следует отметить, что в большинстве случаев полиминеральные породы (каменная мука) разжижаются лучше чем цемент вследствие того, что минеральные порошки не подвержены гидратации, а частицы цемента с первых секунд после водозатворения вступают в гидратационные процессы (особенно алюминатные фазы) и связывают большое количество молекул воды (C_2AH_8 , C_4AH_{13-19} , эттрингит и др.).

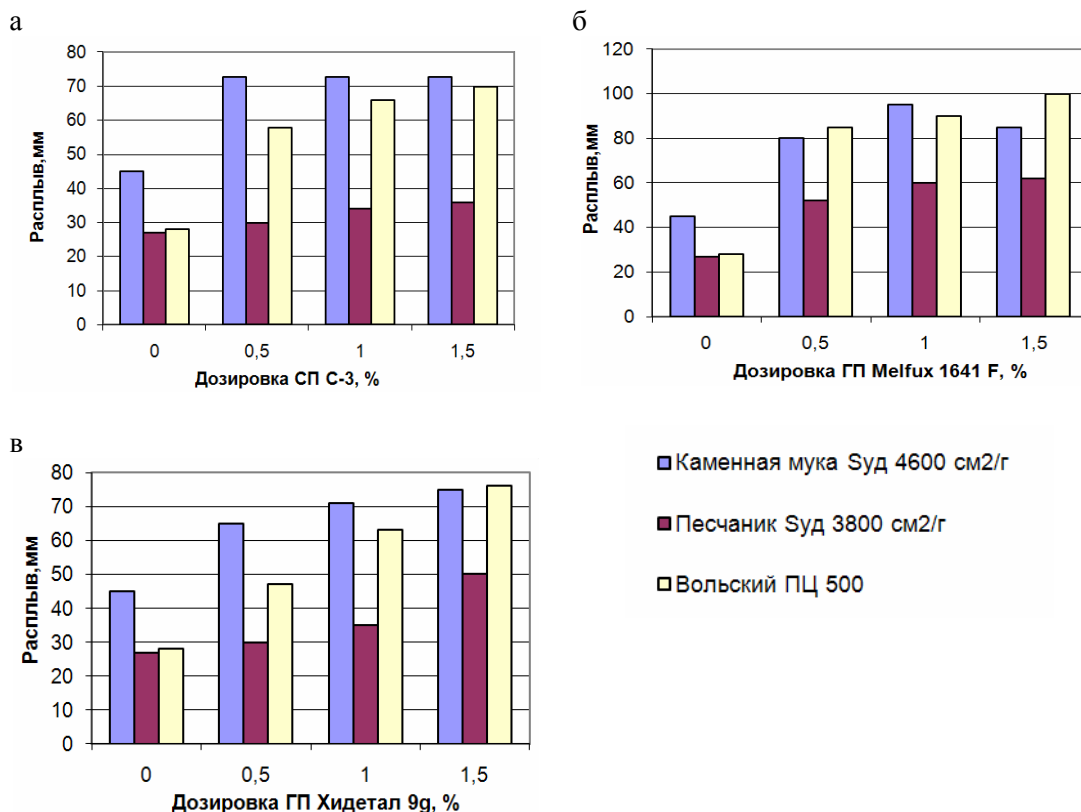


Рис. 1. Влияние супер- и гиперпластификаторов на растекаемость цементных и минеральных суспензий:
а – СП С-3; б – ГП Melflux 1641F; в – ГП Хидетал 9g

Различная эффективность СП на основе С-3 и на поликарбоксилатной основе, по нашему мнению, может определяться, главным образом, химическим поведением и количеством функциональных групп, а также конформационным строением молекул СП.

Дальнейшие исследования были выполнены на цементно-минеральных смесях с целью определения эффективности разжижающего влияния СП. Во всех экспериментах количество микронаполнителей принималось в соотношении 1:4 к цементу. Результаты исследований, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что в большинстве случаев смеси цемента и гранитной каменной муки лучше разжижаются в присутствии СП в отличие от чисто цементных систем и смесей цемента с песчаником и опокой. Наибольшее снижение эффективности СП было отмечено для смеси цемента с опокой. Подобное явление может быть связано не только с зарядовым состоянием поверхности, но также с повышенной пористостью опоки. Следует отметить, что характерной особенностью для смесей «цемент + песчаник» является значительное повышение реологической активности СП в отличие от разжижающего влияния добавки на чистый молотый песчаник.

Это позволяет сделать предположение о том, что в присутствии цемента (а именно частиц гидратной извести, выделяющейся при гидратации) происходит частичная перезарядка поверхности частиц песчаника, способствующая повышению реологической активности СП.

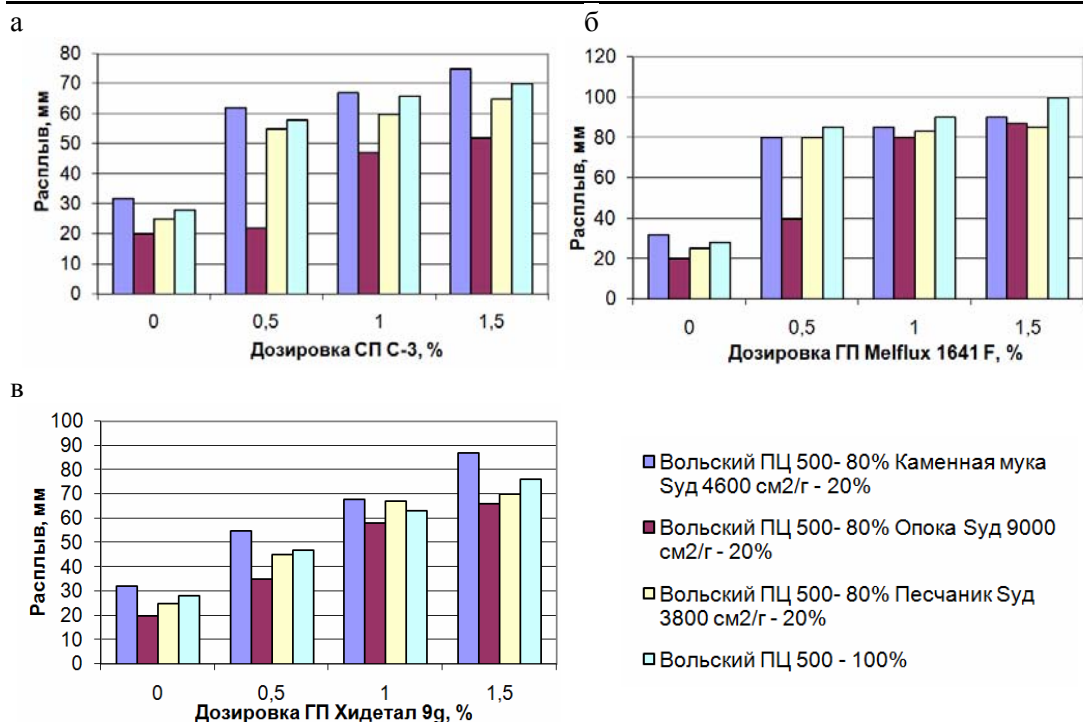


Рис. 2. Влияние супер- и гиперпластификаторов на растекаемость цементно-минеральных суспензий: а – СП С-3; б – ГП Melflux 1641F; в – ГП Хидетал 9γ

С целью подтверждения этого предположения была выполнена серия экспериментов по оценке эффективности различных СП на смесях цемента и микрокварца ($S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$), а также на чистом микрокварце. В смесях цемента и микрокварца доля микрокварца составляла 10, 20 и 40 % от общей массы. В качестве пластификаторов использовались С-3 и Melflux 1641F с дозировками от 0,5 до 2 % от массы цемента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что смеси цемента и микрокварца, так же, как и смеси песчаника и цемента, значительно лучше разжижаются в присутствии С-3 и Melflux 1641F, в отличие от чистого микрокварца. Установлено, что при дозировке 0,5-2 % чистый микрокварц в присутствии СП С-3 разжижается в среднем на 155–165 %, а в присутствии СП Melflux 1641F – в среднем на 165-185 %, в то время, как расплывы смеси цемента и микрокварца с добавкой С-3 возрастают на 330–335 %, а с добавкой Melflux 1641F – в среднем на 355–365 %.

В целом показано, что в системах «цемент + микрокварц» при оптимальной дозировке 0,5–1,5 % от массы цемента добавка Melflux 1641F является более эффективной, чем С-3. Отмечено также, что с увеличением доли микрокварца в системе «цемент + микрокварц» эффективность СП возрастает незначительно.

Ранее экспериментально установлено, что характер реологического поведения тонкомолотого кальцита в присутствии различных СП (С-3 и СП на поликарбоксилатной основе) близок к характеру поведения гранитной каменной муки. Поэтому карбонатные микронаполнители в смеси с тонкомолотым песком и песком-заполнителем могут быть эффективно использованы (в том числе и в смеси с микрокремнеземом) для получения высокопрочных и самоуплотняющихся бетонов классов В 100–В 140, основой которых является высокотекучая реологическая матрица [8].

В данной работе исследован характер разжижающего влияния СП Melflux 2651F и С-3 на тонкомолотые карбонатные породы: молотый мрамор, $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ и карбонатную муку Иссинского карьера (Пензенская область), $S_{уд} = 461 \text{ м}^2/\text{кг}$. В качестве критерия разжижающего действия СП принимались расплывы цементных и минеральных суспензий по микровискозиметру Суттарда. Результаты, представленные в таблице, показали, что молотый мрамор наиболее подвержен разжижающему влиянию СП, чем

карбонатная мука и портландцемент. Это свидетельствует о том, что наибольшей реологической активностью обладают кристаллические породы, в отличие от аморфных пород.

Влияние СП на разжижение цементных и минеральных суспензий

Вид цемента/каменной муки	Диаметр распыла (%) по отношению к цементу	
	Melflux 2651 F	C-3
Портландцемент ПЦ 500 Д0 без добавки	100	100
Портландцемент ПЦ 500 Д0 с добавкой СП	224	165
Гранит молотый с добавкой СП	203	168
Мрамор молотый с добавкой СП	245	217
Карбонатная мука с добавкой СП	131	155

Таким образом, показано, что в цементно-минеральных смесях на основе цемента и силикатных минеральных порошков в присутствии гидратирующегося цемента происходит изменение зарядового состояния частиц кварца, что является основой для повышения роли СП в наполненных цементно-минеральных системах. Подобный факт должен являться основой для расширения возможности использования тонкомолотых песков, микрокварца и других подобных добавок в бетонах нового поколения взамен традиционного используемого и достаточно дефицитного микрокремнезема.

В цементных материалах высокая плотность структуры может быть достигнута не только за счёт значительного снижения водосодержания вследствие применения высокоэффективных СП, но и вследствие введения в систему 2-3 фракций минеральных микронаполнителей, близких друг к другу по кристаллохимическому строению, и наиболее целесообразным в этом случае является использование микронаполнителей, параметры кристаллических ячеек которых соизмеримы с аналогичными параметрами гидратных фаз цементных систем.

Применение в цементных системах дисперсных и ультрадисперсных минеральных наполнителей со структурными особенностями, близкими к цементным минералам, является целесообразным не только вследствие проявления многими из них химической активности, но и вследствие возможности встраивания их молекул в структуры кристаллогидратных фаз в процессе гидратации.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наибольшая эффективность применения карбонатных микронаполнителей обеспечивается не в «тощих» смесях, а в составах со средним расходом цемента. Это объясняется тем, что одним из возможных механизмов активирующего влияния карбонатных пород является эпитаксиальное наращивание гидратных новообразований на частицах тонкодисперсного кальцита как на затравках кристаллизации. Недостаток цементной матрицы в составах с малым расходом вяжущего снижает эффективность кальцита как подложки для формирования эпитаксиальных контактов срастания.

В модифицированных цементных системах в процессе роста частиц и кристаллизации большую вероятность встраивания в структуру гидратов имеют молекулы и ассоциаты веществ, близких к ним по кристаллохимическому строению. В полиминеральном цементном вяжущем, наполненном тонкодисперсным кальцитом, эта возможность является избирательной, поскольку лишь некоторые гидратные фазы имеют параметры кристаллических ячеек, близкие к кальциту. В связи с этим в процессе гидратации возможны два механизма действия кальцита:

- встраивание молекул CaCO_3 в структуру гидратов, близких по кристаллохимическому строению;
- структурообразующее влияние поверхности кальцита как подложки для ориентированной кристаллизации новообразований.

Многообразие габитусов кристаллов кальцита и значительное пересыщение в системе в начальный период кристаллизации позволяет предполагать возможность протекания этих процессов параллельно.

В гетерогенных цементных системах кристаллизация новообразований происходит в условиях возможного вовлечения в структуру (особенно на ранних стадиях) ассоциатов и комплексов, а также гидратированных ионов. В связи с этим следует отметить, что рассматривая процессы кристаллизации наполненных и модифицированных цементных систем, во-первых, нельзя обобщенно говорить о структуре новообразований в целом, поскольку каждая гидратная фаза имеет индивидуальную, свойственную только ей кристаллическую структуру, во-вторых, следует учитывать кристаллическую основу минеральных микронаполнителей (при их индивидуальном использовании) и химические свойства, строение и поведение соединений, вводимых в цементные системы в виде добавок. При анализе процессов образования гидратов следует учитывать значительные различия в свойствах поверхностных слоев частиц цемента и наполнителя по сравнению с внутренним материалом зерна. Например, механохимическая активация поверхности при помолке способствует изменению не только удельной поверхности частиц, но и её энергетического состояния.

В отношении гидратации и твердения модифицированных цементных (или мономинеральных) веществ следует высказать предположение, что при использовании минеральных модификаторов (наполнителей), например кальцита, близкие параметры кристаллических решеток некоторых гидратных фаз цемента ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_2AH_8 , CAH_{10} , C_4AH_{13} , C_4AH_{19} , C_4FH_{13} и др.) позволяют говорить о возможности встраивания молекул CaCO_3 в структуру этих гидратов без существенного изменения порядка кристаллизации.

В процессе роста кристаллов молекулы, адсорбирующиеся на поверхности, располагаются таким образом, чтобы атомы имели максимальное число связей с атомами кристалла. Это способствует образованию и разрастанию в адсорбционном слое двумерных кластеров, поскольку закрепившиеся на поверхности молекулы способствуют увеличению количества адсорбционных центров и вовлечению новых молекул в структуру кристалла. В итоге это приводит к последовательному отложению мономолекулярных слоёв на поверхности кристалла. На электронно-микроскопическом снимке поверхности гидратированного C_3A ($\times 7000$) (рис. 3) отчетливо видно образование кристаллических слоев на пластинках AFm-фаз. Поверхность кристалла имеет слоистый ступенчатый рельеф, и зарождение ступеней происходит у наиболее активной вершины. Ступени, образованные монослоями, перемещаются от активной грани вдоль поверхности с флуктуирующей скоростью. Различные размеры и форма ступеней свидетельствуют о том, что скорости их перемещения также различны. Возможно, что в момент изменения скоростей движения смежных ступеней они могут сливаться, удваивая высоту слоя.

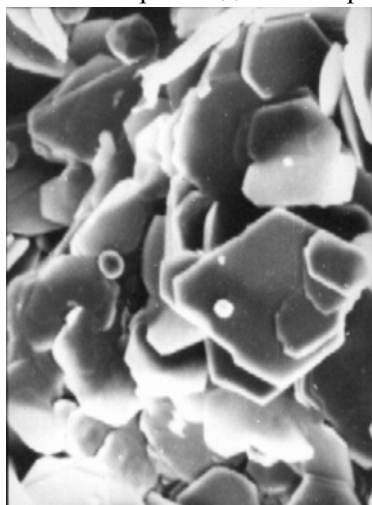


Рис. 3. Сканирующая электронная микрокопия поверхности гидратированного C_3A ($\times 7000$)

Это позволяет сделать предположение, что в модифицированных цементных системах в процессе роста частиц и кристаллизации большую вероятность встраивания в структуру гидратов имеют молекулы и ассоциаты вещества, близкого к ним по кристаллохимическому строению. В полиминеральном цементном вяжущем, наполненном тонкодисперсным кальцитом, эта возможность является избирательной, поскольку лишь некоторые гидратные фазы ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_2AH_8 , $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$, $\text{C}_4\text{FH}_{13-19}$ и некоторые другие) имеют параметры кристаллических ячеек, близкие к кальциту. Например, у портландита параметр элементарной гексагональной ячейки $c = 0,4909$ нм является близким к параметру гексагональной структуры кальцита: $a = 0,4969$ нм. Элементарные ячейки всех AFm-фаз

основаны на гексагональных структурных элементах с параметром 0,57-0,59 нм.

В процессе «встраивания» молекулы инородного вещества сначала адсорбируются на поверхности, затем поглощаются формируемыми кластерами и могут мигрировать с поверхности в объем структуры. В результате в кристаллических структурах образуются поверхностные и объемные дефекты, которые могут объединяться в дислокации.

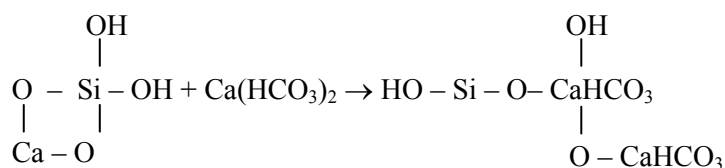
В многофазовых системах ассоциаты и зародыши кристаллизации могут образоваться как в объеме среды, так и на поверхности частиц вещества, сформированного ранее. Однако лишь часть зародышей может с течением времени дорасти до нанокристаллов.

Дальнейший рост кристаллов зависит от того, какой гранью закрепился нанокристалл на поверхности подложки, и от её кристаллографической структуры. Если параметры кристаллической ячейки нанокристалла и основания близки и на поверхности отсутствуют дефекты (сопрягаемые поверхности являются плоскими), то силы связи в зоне контакта значительно возрастают и нанокристалл закрепляется на подложке – происходит эпитаксиальное наращивание кристалла. Однако опять-таки в силу неоднородной и дефектной поверхности основания это наращивание является также неоднородным и может способствовать развитию внутренних напряжений в поликристаллических зонах.

В работе [9] отмечается, что в присутствии тонкодисперсного кальцита происходит ускорение гидратации силикатных фаз и, кроме того, первичные продукты гидратации C–S–H появляются на частицах кальцита, а не на поверхности C₃S, вследствие чего поверхность C₃S является более доступной для дальнейшей гидратации. Кроме того, диаметр (толщина) волокон (игл) C–S–H может составлять до 7-10 нм (несколько миллионных долей миллиметра), что позволяет при контакте с заполнителем формировать прочный контактный слой на границе раздела «песок-заполнитель – цементный камень» в отличие от более крупных гексагональных пластинок AFm-фаз и еще более крупных пластинок Ca(OH)₂.

Таким образом, в цементных системах, наполненных тонкодисперсным карбонатным материалом, создаются реальные условия не только для формирования двойных и тройных солей на основе гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, но и эпитаксиального наращивания гидратов на карбонатной подложке микрозаполнителя. Одним из основных условий в этих процессах является количество воды в системе, обеспечивающее создание необходимого пересыщения и химико-минералогический состав вяжущего.

В технологии бетонов кальцит вводится либо взамен цемента, с целью сокращения его расхода (до 10-15 %), либо в многокомпонентные бетоны нового поколения (до 100 % от массы цемента) для увеличения дисперсной матрицы и соответственно для улучшения реотехнологических свойств бетонных смесей. Вместе с тем в исследованиях недостаточно внимания уделяется процессам раннего структурообразования и анализу состава гидратных фаз цементных материалов с добавками тонкодисперсного кальцита, что во многом определяет структуру цементных материалов, их прочность и долговечность. Известно, что активация начального структурообразования обусловлена формированием гидратов AFm- и AFt-фаз и в более поздний период – формированием гидросиликатной структуры. В работе [10] выполнен рентгенофазовый анализ состава продуктов гидратации цементного камня, показывающий, что в системе происходит активное формирование гидросиликатов кальция различной структуры, следовательно, повышение прочности может происходить за счет комплексных солей, образующихся на основе гидросиликатов кальция в присутствии кальцита, например CaHSiO₄ Ca(HCO₃)₂, по схеме:



С целью изучения влияния кальцита на состав гидратных фаз цементного камня была выполнена серия рентгенофазовых исследований образцов гидратированного

цемента с добавкой тонкодисперсного кальцита. Ранее [10] установлено, что в присутствии кальцита проходит активация образования гидросиликатных фаз, близких по структуре к ксонотлиту ($6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), гидролиту ($2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$) и трускотиту ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 0,67\text{H}_2\text{O}$). Из этого следует, что повышение прочности цементных материалов с добавкой кальцита может быть объяснено формированием в цементной системе гидросиликатов кальция различного кристаллохимического строения и гранулометрической неоднородности. По данным выполненного рентгенофазового анализа в присутствии кальцита происходит образование и кристаллизация большого количества дисперсных метастабильных химически активных фаз, уплотняющих структуру и повышающих прочность. Исследования показали, что в составе гидратных фаз присутствуют моногидросульфоалюминат кальция и C_3AH_6 . Образование моногидросульфоалюмината кальция ГСАК-1 происходит вследствие перекристаллизации этtringита, хотя следует иметь в виду, что термодинамическая вероятность реакции его образования достаточно высока.

Образование гидратов C_3AH_6 в цементной системе является положительным фактором, поскольку гидраты C_3AH_6 могут кристаллизоваться в виде гексагональных призм, игл или вытянутых пластинок, способных образовывать дендриты, объединяться в устойчивые пространственные структуры и уплотнять и армировать структуру.

Уплотнению цементной системы с добавкой кальцита способствуют не только гидраты AFt-фазы и C_3AH_6 , но и гидроксид алюминия, который выделяется при гидролизе алюминатных минералов и в ходе реакций с C_3AH_6 . В дальнейшем он может кристаллизоваться с образованием бемита и гидраргиллита.

На раннем этапе гидратации, когда происходит активное образование гидросульфоалюминатов и гидратов AFt-фазы, возможна также реакция образования гидрокарбоалюмината кальция трёхсульфатной формы. В случае, когда система наполнена тонкодисперсным кальцитом, к 28 суткам этtringит на рентгенограммах практически не фиксируется. Это свидетельствует о переходе его в моногидросульфоалюминат кальция. Снижение количества этtringита сопровождается увеличением доли $\text{Al}(\text{OH})_3$ и ГСАК-1. В период перекристаллизации этtringита в ГСАК-1 может наблюдаться замедление роста прочности, который восстанавливается в дальнейшем вследствие кристаллизации гидросиликатов кальция. Однако следует учесть, что при резком изменении температурных условий твердения (например, прогрев в период до 7 сут и особенно в период 1-3 сут) могут происходить незначительные сбросы прочности, вследствие перекристаллизации C_3AH_6 , а также других AFm-фаз, формирующихся в системе (C_2AH_8 , $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$) в наиболее термодинамически устойчивую фазу C_3AH_6 .

В присутствии C_3AH_6 , $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ возможно вторичное формирование моногидросульфоалюмината кальция, а при избытке CaCO_3 – формирование $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Частицы тонкодисперсного кальцита, располагающиеся между частицами цемента, образуют плотно упакованную систему и способствуют созданию стеснённых условий при твердении, увеличению количества и повышению прочности межчастичных контактов. Гидроокись алюминия, образующаяся в этой системе на ранних этапах твердения, «смягчает» первичный жёсткий гидроалюминатный каркас.

Выполненные исследования показали возможность расширения базы минеральных модифицирующих добавок в цементные материалы с целью повышения эффективности суперпластификаторов и создания реологически активной дисперсной матрицы в дисперсных системах, являющейся одной из важнейших составляющих и неотъемлемым условием создания бетонов нового поколения. Выявлены особенности формирования микроструктуры цементного камня с минеральными тонкодисперсными наполнителями.

Список литературы

1. К вопросу о корреляции усадки и прочности бетонов / Н.И. Макридин, Т.К. Акчурин, О.В. Тараканов, Е.А. Тамбовцева // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2015. – Вып. 3(39). – URL: <http://vestnik.vgasu.ru/attachments/6MaksimovaAkchurinMakridinTarakanovTambovtseva.pdf> (дата обращения 02.10.2017).
2. Тараканов, О.В. Цементные материалы с добавлением углеводов / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2003. – 165 с.
3. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
4. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – №1–2. – С. 62–67.
5. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Беякова, Р.Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 47–53.
6. Калашников, В.И. Влияние вида супер- и гиперпластификаторов на реологические свойства цементно-минеральных суспензий, порошковых бетонных смесей и прочностные свойства бетонов / В.И. Калашников, Е.В. Гуляева, Д.М. Валиев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 12. – С. 40–45.
7. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Ч. 1. Виды реологических матриц в бетонной смеси и стратегия повышения прочности бетона и экономии его в конструкциях / В.И. Калашников // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. – 2007. – №5. – С. 8–10.
8. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70–75.
9. Штарк, Й. Гидратация цемента и микроструктура бетона / Й. Штарк // Цемент и его применение. – 2011. – №2. – С. 90–94.
10. Тараканов, О.В. Гидратация и твердение цементных материалов с добавками минеральных шламов / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 153 с.

References

1. To the question of correlation of shrinkage and strength of concrete / N.I. Makridin, T.K. Akchurin, O.V. Tarakanov, E.A. Tambovtseva // Internet-bulletin VolgGASU. 2015. – Issue 3 (39). – URL: <http://vestnik.vgasu.ru/attachments/6MaksimovaAkchurinMakridinTarakanovTambovtseva.pdf> (circulation date 02.10.2017).
2. Tarakanov, O.V. Cement materials with the addition of carbohydrates / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2003. – 165 p.
3. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting / S.A. Mironov. – 3rd ed., revised and enlarged. – M.: Stroiizdat, 1975. – 700 p.
4. Kalashnikov, V.I. About the using of complex additives in new generation concretes / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov // Building materials. – 2017. – №1–2. – P. 62–67.
5. Self-compacting new generation concrete based on local raw materials / V.I. Kalashnikov, O.V., E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №2. – P. 47–53.
6. Kalashnikov, V.I. Influence of kind of super- and hyperplasticizers on rheological properties of cement-mineral suspensions, powder concrete mixtures and strength properties of concretes / V.I. Kalashnikov, E.V. Gulyaeva, D.M. Valiev // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2011. – №12. – P. 40–45.
7. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology to the future of concrete. P. 1. Types of rheological matrices in a concrete mix and strategy of increasing the strength of concrete and saving it in structures / V.I. Kalashnikov // Building materials, equipment, technologies of XXI century. Concrete technology. – 2007. – №5. – P. 8–10.
8. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, co-ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov [etc.] // Building Materials. – 2014. – №9. – P. 70–75.
9. Stark J. Hydration of cement and microstructure of concrete / J. Stark // Cement and its application. 2011. – №2. – P. 90–94.
10. Tarakanov, O.V. Hydration and hardening of cement materials with additives of mineral sludge / O.V. Tarakanov, T.V. Pronina. – Penza: PGUAS, 2006. – 153 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 539.37

*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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

РАЗРЕШАЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

С.В. Бакушев

Для плоской деформации сплошных сред, механическое поведение которых описывается математическими моделями, в которых физические соотношения имеют форму произвольных перекрёстных зависимостей между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов обобщённых напряжений и нелинейных деформаций рассматривается построение разрешающих уравнений в перемещениях в цилиндрической системе координат. Геометрическая нелинейность учитывается при помощи геометрических соотношений, в которых, в отличие от геометрически линейных сплошных сред, сохраняются квадратичные слагаемые. Разрешающая система уравнений представляет собой систему двух квазилинейных дифференциальных уравнений второго порядка от двух независимых переменных - перемещений точек сплошной среды в радиальном и тангенциальном направлениях.

Ключевые слова: сплошная среда, геометрическая и физическая нелинейность, разрешающие уравнения в перемещениях, цилиндрическая система координат

RESOLVING EQUATIONS OF FLAT DEFORMATION IN DISPLACEMENT FOR PHYSICALLY AND GEOMETRICALLY NONLINEAR CONTINUUM IN CYLINDRICAL COORDINATES

S.V. Bakushev

For flat deformation of continuum, mechanical behavior of which is described by mathematical models where physical correlation have the form of arbitrary cross dependencies between the first and second invariants of tensors of invariants deviators of generalized stress and non-linear deformations (constructing of resolving equation in displacement in cylindrical system is discussed). Geometric non-linearity is taken into account using geometrical ratios where, unlike geometrically linear (continuum quadratic components are retained). Resolution system of two equations is a system of two quasilinear differential equations of the second order from two independent variables-displacements solid points continuum in the radial and tangential directions.

Keywords: solid array, geometrical and physical nonlinearity, resolving equations in displacement, cylindrical coordinate system

Введение. В монографии В.В.Новожилова [1] достаточно подробно описана общая теория ортогональных криволинейных координат и приведён необходимый минимум расчётных формул для геометрически и физически нелинейной теории упругости как в трёхмерной постановке, так и для решения плоской задачи. Вместе с тем ряд положений, в частности построение разрешающих уравнений в перемещениях для плоской деформации геометрически и физически нелинейных сплошных сред в цилиндрической системе координат, остались за рамками монографии. В данной работе на основе материалов книги [1] выводятся разрешающие дифференциальные уравнения в перемещениях в цилиндрической системе координат для плоской деформации сплошных сред с учётом геометрической и физической нелинейности.

Построение уравнений. Введём цилиндрические координаты: r, φ, Z . Связь цилиндрических координат с декартовыми x, y, z описывается соотношениями:

$$x = r \cdot \cos \varphi; \quad y = r \cdot \sin \varphi; \quad z = Z. \quad (1)$$

Пусть $\alpha_1 = r, \alpha_2 = \varphi, \alpha_3 = Z$. При этом параметры Ляме [1] будут равны:

$$H_1 = 1, \quad H_2 = r, \quad H_3 = 1. \quad (2)$$

Пусть u_r, u_φ, u_Z – проекции вектора перемещения некоторой точки $M(r, \varphi, Z)$ сплошной среды на оси локального триэдра единичных векторов $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_\varphi, \mathbf{k}_Z$ в состоянии до деформации. В случае плоской деформации перемещение в направлении оси Z будет равно нулю, то есть $u_Z = 0$, а перемещения в направлении двух других осей координат не будут зависеть от координаты z : $u_r = u_r(r, \varphi); \quad u_\varphi = u_\varphi(r, \varphi)$.

При этом параметры, образующие компоненты тензора нелинейных деформаций [1, формулы (2.6) и (2.7)], получают вид:

$$\begin{aligned} e_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad e_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + u_r \right); \quad e_{zz} = 0; \\ e_{r\varphi} &= e_{\varphi r} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} u_\varphi; \quad e_{\varphi z} = e_{z\varphi} = 0; \quad e_{zr} = e_{rz} = 0; \\ 2\omega_r &= 0; \quad 2\omega_\varphi = 0; \quad 2\omega_z = \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{u_\varphi}{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, компоненты тензора нелинейных деформаций [1, формулы (2.15)] в цилиндрической системе координат будут равны:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} &= e_{rr} + \frac{1}{2} \left[e_{rr}^2 + (e_{r\varphi}^+)^2 \right]; \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = e_{\varphi\varphi} + \frac{1}{2} \left[e_{\varphi\varphi}^2 + (e_{r\varphi}^-)^2 \right]; \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \varepsilon_{\varphi r} = e_{r\varphi} + e_{rr} e_{r\varphi}^- + e_{\varphi\varphi} e_{r\varphi}^+; \\ \varepsilon_{\varphi Z} &= \varepsilon_{Z\varphi} = 0; \quad \varepsilon_{Zr} = \varepsilon_{rZ} = 0; \quad \varepsilon_{ZZ} = 0.\end{aligned}\quad (4)$$

В формулах (4) обозначено:

$$e_{r\varphi}^+ = \frac{1}{2} e_{r\varphi} + \omega_Z; \quad e_{r\varphi}^- = \frac{1}{2} e_{r\varphi} - \omega_Z. \quad (5)$$

Физические соотношения при этом получают вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^* &= K^* \varepsilon + 2G^* \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \quad \sigma_{\varphi\varphi}^* = K^* \varepsilon + 2G^* \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{r\varphi}^* &= G^* \varepsilon_{r\varphi}; \quad \sigma_{\varphi r}^* = G^* \varepsilon_{\varphi r}; \quad \sigma_{ZZ}^* = K^* \varepsilon - \frac{2}{3} G^* \varepsilon; \\ \sigma_{rZ}^* &= \sigma_{Zr}^* = 0; \quad \sigma_{\varphi Z}^* = \sigma_{Z\varphi}^* = 0.\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь $\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{ZZ}$; K^* – геометрически нелинейный аналог модуля объёмного расширения (сжатия); G^* – геометрически нелинейный аналог модуля сдвига; σ_{rr}^* , $\sigma_{\varphi\varphi}^*$, $\sigma_{r\varphi}^* = \sigma_{\varphi r}^*$, σ_{ZZ}^* – обобщённые ненулевые напряжения.

Выпишем далее коэффициенты s_{ij} системы уравнений равновесия [1, формулы (3.8)], учитывая при этом соотношения (6) и (3):

$$\begin{aligned}s_{11} &= s_{rr} = \sigma_{rr}^* (1 + e_{rr}) + \sigma_{r\varphi}^* e_{r\varphi}^-; \\ s_{12} &= s_{r\varphi} = \sigma_{rr}^* e_{r\varphi}^+ + \sigma_{r\varphi}^* (1 + e_{\varphi\varphi}); \\ s_{13} &= s_{rZ} = \sigma_{rZ}^* = 0; \\ s_{21} &= s_{\varphi r} = \sigma_{\varphi r}^* (1 + e_{rr}) + \sigma_{\varphi\varphi}^* e_{r\varphi}^-; \\ s_{22} &= s_{\varphi\varphi} = \sigma_{\varphi r}^* e_{r\varphi}^+ + \sigma_{\varphi\varphi}^* (1 + e_{\varphi\varphi}); \\ s_{23} &= s_{\varphi Z} = \sigma_{\varphi Z}^* = 0; \\ s_{31} &= s_{Zr} = \sigma_{Zr}^* (1 + e_{rr}) + \sigma_{Z\varphi}^* e_{r\varphi}^-; \\ s_{32} &= s_{Z\varphi} = \sigma_{Zr}^* e_{r\varphi}^+ + \sigma_{Z\varphi}^* (1 + e_{\varphi\varphi}); \\ s_{33} &= s_{ZZ} = \sigma_{ZZ}^*.\end{aligned}\quad (7)$$

Уравнения равновесия [1, формула (3.11)], принимая во внимание формулы (7), получают вид:

$$\begin{cases} r \frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial s_{\varphi r}}{\partial \varphi} + s_{rr} - s_{\varphi\varphi} + r F_r^* = 0; \\ r \frac{\partial s_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial s_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + s_{r\varphi} + s_{\varphi r} + r F_\varphi^* = 0; \\ r F_Z^* = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь F_r^* , F_φ^* , F_Z^* – проекции объёмной силы на оси локального триэдра $\mathbf{k}_r$, $\mathbf{k}_\varphi$, $\mathbf{k}_Z$.

Подставляя в уравнения (8) формулы (7) и учитывая соотношения (6) и (4), а также принимая во внимание, что в рамках рассматриваемой математической модели

$$K^* = K^*(\varepsilon, \Gamma); \quad G^* = G^*(\varepsilon, \Gamma),$$

то есть

$$\begin{aligned} \frac{\partial K^*}{\partial r} &= \frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{\partial K^*}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial r}; & \frac{\partial K^*}{\partial \varphi} &= \frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} + \frac{\partial K^*}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial \varphi}; \\ \frac{\partial G^*}{\partial r} &= \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial r}; & \frac{\partial G^*}{\partial \varphi} &= \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} + \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial \varphi}, \end{aligned}$$

причём $\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}$, $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2 + \frac{3}{4}\varepsilon_{r\varphi}^2}$, получим запись уравнений равновесия (8) в следующей форме:

$$\left\{ \begin{aligned} &A_{rrr} \frac{\partial e_{rr}}{\partial r} + A_{r\varphi r} \frac{\partial e_{r\varphi}}{\partial r} + A_{\varphi\varphi r} \frac{\partial e_{\varphi\varphi}}{\partial r} + A_{\omega Z r} \frac{\partial \omega_Z}{\partial r} + \\ &+ A_{rr\varphi} \frac{\partial e_{rr}}{\partial \varphi} + A_{\varphi r\varphi} \frac{\partial e_{\varphi r}}{\partial \varphi} + A_{\varphi\varphi\varphi} \frac{\partial e_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + A_{\omega Z \varphi} \frac{\partial \omega_Z}{\partial \varphi} + E_1 + rF_r^* = 0; \\ &B_{rrr} \frac{\partial e_{rr}}{\partial r} + B_{r\varphi r} \frac{\partial e_{r\varphi}}{\partial r} + B_{\varphi\varphi r} \frac{\partial e_{\varphi\varphi}}{\partial r} + B_{\omega Z r} \frac{\partial \omega_Z}{\partial r} + \\ &+ B_{rr\varphi} \frac{\partial e_{rr}}{\partial \varphi} + B_{\varphi r\varphi} \frac{\partial e_{\varphi r}}{\partial \varphi} + B_{\varphi\varphi\varphi} \frac{\partial e_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + B_{\omega Z \varphi} \frac{\partial \omega_Z}{\partial \varphi} + E_2 + rF_\varphi^* = 0. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A_{rrr} &= B'_{\varepsilon r} (1 + e_{rr}) + B'_{\Gamma r} \frac{2(1 + e_{rr})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi}) + B'_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r\varphi}}{\Gamma} e_{r\varphi}^- + rG^* (e_{r\varphi}^-)^2 + \\ &+ 2rG^* (1 + e_{rr})^2 + r\sigma_{rr}^*; \\ A_{r\varphi r} &= B'_{\varepsilon r} \frac{(e_{r\varphi}^+ + e_{r\varphi}^-)}{2} + B'_{\Gamma r} \frac{e_{r\varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi}) + B'_{\Gamma r} \frac{e_{r\varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\ &+ \left(B'_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r\varphi}}{\Gamma} + rG^* e_{r\varphi}^- \right) \left(1 + \frac{e_{rr}}{2} + \frac{e_{\varphi\varphi}}{2} \right) + rG^* (1 + e_{rr}) e_{r\varphi}^+ + r \frac{\sigma_{r\varphi}^*}{2}; \\ A_{\varphi\varphi r} &= B'_{\varepsilon r} (1 + e_{\varphi\varphi}) + B'_{\Gamma r} \frac{2(1 + e_{\varphi\varphi})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{rr}) + B'_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r\varphi} e_{r\varphi}^+}{\Gamma} + rG^* e_{r\varphi}^+ e_{r\varphi}^-; \\ A_{\omega Z r} &= B'_{\varepsilon r} (e_{r\varphi}^+ - e_{r\varphi}^-) + B'_{\Gamma r} \frac{2e_{r\varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi}) - B'_{\Gamma r} \frac{2e_{r\varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\ &+ B'_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r\varphi}}{\Gamma} (e_{\varphi\varphi} - e_{rr}) + 2rG^* e_{r\varphi}^+ (1 + e_{rr}) + rG^* e_{r\varphi}^- (e_{\varphi\varphi} - e_{rr}) - r\sigma_{r\varphi}^*; \\ A_{rr\varphi} &= B'_{\varepsilon r} (1 + e_{rr}) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{2(1 + e_{rr})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi}) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r\varphi} e_{r\varphi}^-}{\Gamma} + \\ &+ G^* e_{r\varphi}^- (1 + e_{rr}) + \sigma_{\varphi r}^*; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{\varphi r \varphi} &= B'_{\varepsilon \varphi} \frac{(e_{r \varphi}^+ + e_{r \varphi}^-)}{2} + B'_{\Gamma \varphi} \frac{e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ \left[B'_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} + G^* (1 + e_{rr}) \right] \left(1 + \frac{e_{rr}}{2} + \frac{e_{\varphi \varphi}}{2} \right) + G^* (e_{r \varphi}^-)^2 + \frac{1}{2} \sigma_{\varphi \varphi}^*; \\
 A_{\varphi \varphi \varphi} &= B'_{\varepsilon \varphi} (1 + e_{\varphi \varphi}) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{2(1 + e_{\varphi \varphi})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi} e_{r \varphi}^+}{\Gamma} + \\
 &+ G^* e_{r \varphi}^+ (1 + e_{rr}) + 2G^* e_{r \varphi}^- (1 + e_{\varphi \varphi}); \\
 A_{\omega Z \varphi} &= B'_{\varepsilon \varphi} (e_{r \varphi}^+ - e_{r \varphi}^-) + B'_{\Gamma \varphi} \frac{2e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) - B'_{\Gamma \varphi} \frac{2e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ B'_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) + G^* (1 + e_{rr}) (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) - 2G^* (e_{r \varphi}^-)^2 - \sigma_{\varphi \varphi}^*; \\
 B_{rrr} &= B''_{\varepsilon r} (1 + e_{rr}) + B''_{\Gamma r} \frac{2(1 + e_{rr})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r \varphi} e_{r \varphi}^-}{\Gamma} + \\
 &+ 2rG^* e_{r \varphi}^+ (1 + e_{rr}) + rG^* e_{r \varphi}^- (1 + e_{\varphi \varphi}); \\
 B_{r \varphi r} &= B''_{\varepsilon r} \frac{(e_{r \varphi}^+ + e_{r \varphi}^-)}{2} + B''_{\Gamma r} \frac{e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma r} \frac{e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ \left[B''_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} + rG^* (1 + e_{\varphi \varphi}) \right] \left(1 + \frac{e_{rr}}{2} + \frac{e_{\varphi \varphi}}{2} \right) + rG^* (e_{r \varphi}^+)^2 + r \frac{1}{2} \sigma_{rr}^*; \\
 B_{\varphi \varphi r} &= B''_{\varepsilon r} (1 + e_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma r} \frac{2(1 + e_{\varphi \varphi})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + B''_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r \varphi} e_{r \varphi}^+}{\Gamma} + \\
 &+ rG^* e_{r \varphi}^+ (1 + e_{\varphi \varphi}) + \sigma_{r \varphi}^*; \\
 B_{\omega Z r} &= B''_{\varepsilon r} (e_{r \varphi}^+ - e_{r \varphi}^-) + B''_{\Gamma r} \frac{2e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) - B''_{\Gamma r} \frac{2e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ B''_{\Gamma r} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) + 2rG^* (e_{r \varphi}^+)^2 + rG^* (1 + e_{\varphi \varphi}) (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) + r \sigma_{rr}^*; \\
 B_{rr \varphi} &= B''_{\Gamma \varphi} (1 + e_{rr}) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{2(1 + e_{rr})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi} e_{r \varphi}^-}{\Gamma} + G^* e_{r \varphi}^+ e_{r \varphi}^-; \\
 B_{\varphi r \varphi} &= B''_{\varepsilon \varphi} \frac{(e_{r \varphi}^+ + e_{r \varphi}^-)}{2} + B''_{\Gamma \varphi} \frac{e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ \left(B''_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} + G^* e_{r \varphi}^+ \right) \left(1 + \frac{e_{rr}}{2} + \frac{e_{\varphi \varphi}}{2} \right) + G^* e_{r \varphi}^- (1 + e_{\varphi \varphi}) + \frac{1}{2} \sigma_{\varphi r}^*; \\
 B_{\varphi \varphi \varphi} &= B''_{\varepsilon \varphi} (1 + e_{\varphi \varphi}) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{2(1 + e_{\varphi \varphi})}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi} e_{r \varphi}^+}{\Gamma} + G^* (e_{r \varphi}^+)^2 + \\
 &+ 2G^* (1 + e_{\varphi \varphi})^2 + \sigma_{\varphi \varphi}^*; \\
 B_{\omega Z \varphi} &= B''_{\varepsilon \varphi} (e_{r \varphi}^+ - e_{r \varphi}^-) + B''_{\Gamma \varphi} \frac{2e_{r \varphi}^+}{3\Gamma} (2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi \varphi}) - B''_{\Gamma \varphi} \frac{2e_{r \varphi}^-}{3\Gamma} (2\varepsilon_{\varphi \varphi} - \varepsilon_{rr}) + \\
 &+ B''_{\Gamma \varphi} \frac{\varepsilon_{r \varphi}}{\Gamma} (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) + G^* e_{r \varphi}^+ (e_{\varphi \varphi} - e_{rr}) - 2G^* e_{r \varphi}^- (1 + \varepsilon_{\varphi \varphi}) + \sigma_{\varphi r}^*;
 \end{aligned}$$

$$E_1 = \sigma_{rr}^* (1 + e_{rr}) - \sigma_{\varphi\varphi}^* (1 + e_{\varphi\varphi}) - 2\sigma_{r\varphi}^* \omega_Z;$$

$$E_2 = \sigma_{rr}^* e_{r\varphi}^+ + \sigma_{\varphi\varphi}^* e_{r\varphi}^- + \sigma_{r\varphi}^* (2 + e_{rr} + e_{\varphi\varphi}).$$

Кроме того,

$$\begin{aligned} B'_{\varepsilon r} &= r \left[(1 + e_{rr}) A_{\varepsilon r} + e_{r\varphi}^- \varepsilon_{r\varphi} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} \right]; & B'_{\Gamma r} &= r \left[(1 + e_{rr}) A_{\Gamma r} + e_{r\varphi}^- \varepsilon_{r\varphi} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} \right]; \\ B'_{\varepsilon\varphi} &= \left[(1 + e_{rr}) \varepsilon_{\varphi r} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} + e_{r\varphi}^- A_{\varepsilon\varphi} \right]; & B'_{\Gamma\varphi} &= \left[(1 + e_{rr}) \varepsilon_{\varphi r} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} + e_{r\varphi}^- A_{\Gamma\varphi} \right]; \\ B''_{\varepsilon r} &= r \left[e_{r\varphi}^+ A_{\varepsilon r} + (1 + e_{\varphi\varphi}) \varepsilon_{r\varphi} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} \right]; & B''_{\Gamma r} &= r \left[e_{r\varphi}^+ A_{\Gamma r} + (1 + e_{\varphi\varphi}) \varepsilon_{r\varphi} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} \right]; \\ B''_{\varepsilon\varphi} &= \left[e_{r\varphi}^+ \varepsilon_{\varphi r} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon} + (1 + e_{\varphi\varphi}) A_{\varepsilon\varphi} \right]; & B''_{\Gamma\varphi} &= \left[e_{r\varphi}^+ \varepsilon_{\varphi r} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma} + (1 + e_{\varphi\varphi}) A_{\Gamma\varphi} \right], \end{aligned}$$

причём

$$\begin{aligned} A_{\varepsilon r} &= K^* + \varepsilon \frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon} - \frac{2}{3} G^* + 2 \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right) \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon}; \\ A_{\Gamma r} &= \varepsilon \frac{\partial K^*}{\partial \Gamma} + 2 \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right) \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma}; \\ A_{\varepsilon\varphi} &= K^* + \varepsilon \frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon} - \frac{2}{3} G^* + 2 \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right) \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon}; \\ A_{\Gamma\varphi} &= \varepsilon \frac{\partial K^*}{\partial \Gamma} + 2 \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right) \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma}. \end{aligned}$$

Вычисляя по формулам (3) производные от параметров e_{rr} , $e_{\varphi\varphi}$, $e_{r\varphi} = e_{\varphi r}$, ω_Z по цилиндрическим координатам r и φ и подставляя их в систему (9), получим систему двух дифференциальных уравнений второго порядка относительно двух независимых переменных – перемещений точек сплошной среды в радиальном u_r и тангенциальном u_φ направлениях:

$$\begin{cases} A_1 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + A_2 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \varphi} + A_3 \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} + A_4 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + A_5 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r \partial \varphi} + A_6 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + A + r F_r^* = 0; \\ B_1 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + B_2 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \varphi} + B_3 \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} + B_4 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + B_5 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r \partial \varphi} + B_6 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + B + r F_\varphi^* = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В системе (10)

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{rrr}; & A_4 &= A_{r\varphi r} + \frac{1}{2} A_{\omega Z r}; \\ A_2 &= A_{r\varphi r} \frac{1}{r} - A_{\omega Z r} \frac{1}{2r} + A_{rr\varphi}; & A_5 &= A_{\varphi\varphi r} \frac{1}{r} + A_{r\varphi\varphi} + \frac{1}{2} A_{\omega Z \varphi}; \\ A_3 &= \left(A_{\varphi\varphi\varphi} - \frac{1}{2} A_{\omega Z \varphi} \right) \frac{1}{r}; & A_6 &= A_{\varphi\varphi\varphi} \frac{1}{r}; \\ A &= A_{r\varphi r} \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} u_\varphi - \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) + A_{\varphi\varphi r} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + u_r \right) \right] + \\ &+ A_{\omega Z r} \frac{1}{2r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\varphi \right) - A_{\varphi\varphi r} \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + A_{\varphi\varphi\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + A_{\omega Z \varphi} \frac{1}{2r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + E_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_1 &= B_{rrr}; & B_4 &= B_{r\varphi r} + \frac{1}{2} B_{\omega Zr}; \\
 B_2 &= B_{r\varphi r} \frac{1}{r} - B_{\omega Zr} \frac{1}{2r} + B_{rr\varphi}; & B_5 &= B_{\varphi\varphi r} \frac{1}{r} + B_{\varphi r\varphi} + \frac{1}{2} B_{\omega Z\varphi}; \\
 B_3 &= \left(B_{\varphi r\varphi} - \frac{1}{2} B_{\omega Z\varphi} \right) \frac{1}{r}; & B_6 &= B_{\varphi\varphi\varphi} \frac{1}{r}; \\
 B &= B_{r\varphi r} \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} u_\varphi - \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) + B_{\varphi\varphi r} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + u_r \right) \right] + \\
 &+ B_{\omega Zr} \frac{1}{2r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\varphi \right) - B_{\varphi r\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + B_{\varphi\varphi\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + B_{\omega Z\varphi} \frac{1}{2r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + E_2.
 \end{aligned}$$

Система квазилинейных дифференциальных уравнений (10) является окончательной разрешающей системой уравнений в перемещениях плоской деформации для физически и геометрически нелинейной сплошной среды, записанной в цилиндрических координатах. Для её интегрирования условия на поверхности нелинейно-упругого тела следует записывать в перемещениях. Учитывая квазилинейность данной системы дифференциальных уравнений, её интегрирование следует выполнять приближёнными (численными) методами. Если в основу решения положить итерационную процедуру, то в качестве начального приближения следует брать решение рассматриваемой задачи в геометрически и физически линейной постановке, когда разрешающая система дифференциальных уравнений в перемещениях для плоской деформации упругой сплошной среды в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\begin{cases} A_1 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + A_3 \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} + A_5 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r \partial \varphi} + A + F_r = 0; \\ B_2 \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \varphi} + B_4 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + B_6 \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + B + F_\varphi = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 A_1 &= K_0 + \frac{4}{3} G_0; \quad A_3 = \frac{1}{r^2} G_0; \quad A_5 = \frac{1}{r} \left(K_0 - \frac{1}{3} G_0 \right); \\
 A &= - \left(K_0 - \frac{4}{3} G_0 \right) \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} u_r \right) - \frac{1}{r^2} G_0 + \\
 &+ \frac{1}{r} \left\{ \left(K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right) \left[\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{3K_0 - 2G_0}{3K_0 + 4G_0} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} u_r \right) \right] - \right. \\
 &\left. - \left(K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right) \left[\frac{3K_0 - 2G_0}{3K_0 + 4G_0} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} u_r \right) \right] \right\}; \\
 B_2 &= \frac{1}{r} \left(K_0 - \frac{1}{3} G_0 \right); \quad B_4 = G_0; \quad B_6 = \frac{1}{r^2} \left(K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right); \\
 B &= -G_0 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r^2} u_\varphi \right) + \frac{1}{r^2} \left(K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right) \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \\
 &+ \frac{2}{r} G_0 \left(\frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right).
 \end{aligned}$$

Заключение. Представленные в статье результаты могут быть использованы при определении напряжённо-деформированного состояния массивных тел, механическое поведение которых описывается произвольными перекрёстными зависимостями между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов обобщённых напряжений и нелинейных деформаций в цилиндрических координатах.

Список литературы

1. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – М.: Судпромгиз, 1958. – 370 с.

References

1. Novozhilov, V.V. The theory of elasticity / V.V. Novozhilov. – M.: Sudpromgiz, 1958. – 370 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАБИЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Рассмотрено изменение амплитуды колебаний температуры наружного воздуха $A, ^\circ\text{C}$, для ряда регионов I и II климатических районов страны и показано ее влияние на формирование теплового режима помещений. Предложены конструктивные решения наружных стен из новых строительных материалов, разработанных в ФГБОУ ВО «ПГУАС». Конструкции стен позволяют снижать величину A в условиях резких похолоданий или при отключении системы отопления. Это достигается путем расположения в многослойной конструкции слоя из тяжелого композита или другого бетона большой плотности со стороны помещения, а слоя из неавтоклавного ячеистого бетона – со стороны наружной поверхности или в средней части конструкции.

Ключевые слова: наружные ограждающие конструкции, тепловой режим помещений, амплитуда колебаний температуры, климатические зоны

EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES FOR PROVIDING A STABLE THERMAL MODE IN THE APARTMENTS

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

There was considered The amplitude of temperature change of outside air $A, ^\circ\text{C}$, for a number of regions of the I and II climatic zones of the country is considered. Its influence on the formation of the thermal mode of the apartments is shown. The structural solutions of external walls from new building materials, developed in Penza State University of Architecture and Construction, were proposed, enabling to reduce the size of A in the period of sharp cold or when the heating system is switched off. This is achieved by location the layer of heavy composite or other high density concrete from the side of the apartments, and the layer of non-autoclaved aerated concrete – from the outer surface or in the middle side of the design/

Keywords: external enclosure structures, thermal mode of the apartments, amplitude of temperature change, climatic zones

При проектировании энергоэффективных зданий особое внимание должно уделяться анализу тех особенностей природно-климатических воздействий в конкретном регионе строительства и конструктивных решений наружных ограждений, которые являются причиной интенсивных тепловых потерь через наружную оболочку зданий. Однако в нормах по тепловой защите зданий расчетные климатические параметры

основаны на средних многолетних данных без должного учета такого климатического фактора, как амплитуда колебаний температуры A , °C, наружного воздуха.

В условиях значительных колебаний величины A при нестационарных воздействиях природной среды наружные ограждения должны иметь достаточную величину таких критериальных показателей, как тепловая инерция конструкции D , коэффициент теплоусвоения ее внутренней поверхности Y , теплоемкость массива ограждения C . Рост критериальных показателей Y и C наружных ограждающих конструкций обеспечивает снижение амплитуды колебаний температуры внутреннего воздуха, то есть повышение теплового комфорта помещений.

Теплотехнический расчет показал, что в таких условиях эксплуатации наибольшие тепловые потери наблюдаются в зданиях, построенных по одной и той же типовой серии, но с наружными ограждениями, которые имеют небольшие величины D и C [1]. Поэтому в зданиях, построенных по таким проектам, может происходить переохлаждение помещений, что повышает удельную величину теплотерьер и снижает энергоэффективность данных сооружений. Значительное влияние на последнюю оказывают компактность формы здания, а также устройство энергоактивных участков на его наружной оболочке [2].

С целью более точной оценки влияния величины A на энергоэффективность проектируемых и эксплуатируемых зданий и сооружений был выполнен анализ ее изменения в периоды похолоданий и потеплений для двух городов II и ряда областей I климатических зон страны (рис. 1, 2, см. таблицу) на основе имеющихся нормативных климатических данных [3,4].

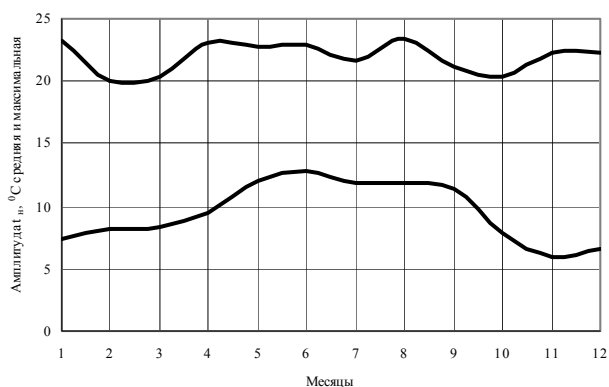


Рис. 1. Амплитуда колебаний температуры наружного воздуха в г. Ульяновске

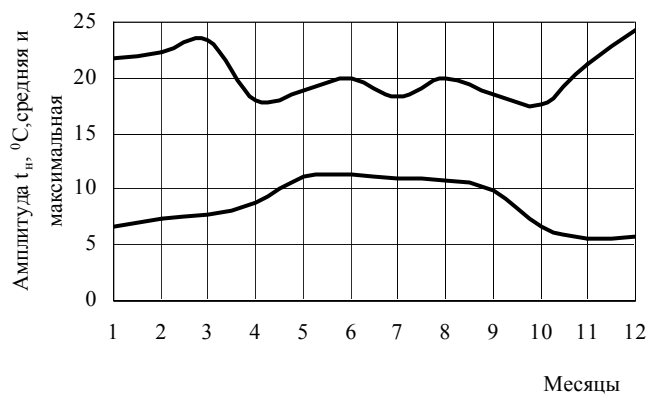


Рис. 2. Амплитуда колебаний температуры наружного воздуха в г. Пензе

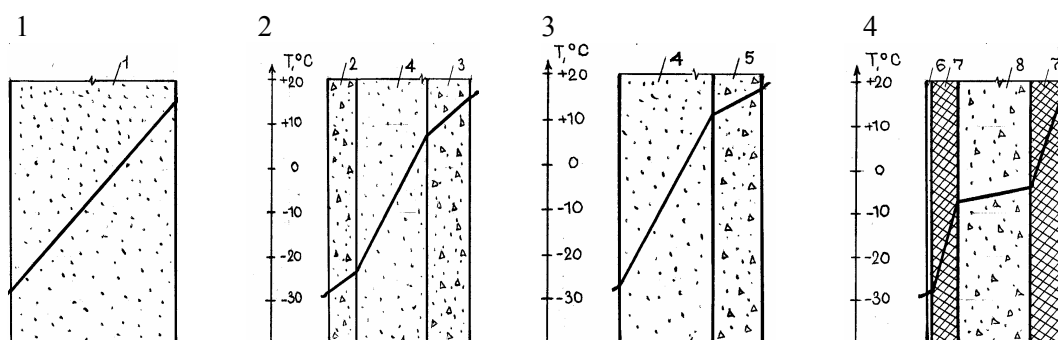
Максимальные значения климатических факторов

Области страны	$t, ^\circ\text{C}$	$A, ^\circ\text{C}$		$V, \text{м/с}$
		январь	июль	
Пензенская	-29	21,7	18,4	5,6 (СЗ)
Архангельская	-39	34,5	24,6	10,6 (ЮЗ)
Камчатская	-20	32,4	25,2	15,6 (ЮВ)
Магаданская	-55	35,2	29,3	16,1 (В)

Примечание. t ($^\circ\text{C}$) – средняя расчетная температура наружного воздуха в январе с обеспеченностью 0,92; A ($^\circ\text{C}$) – максимальные суточные амплитуды колебаний температуры наружного воздуха; V (м/с) – максимальные значения средних скоростей ветра по направлениям в январе.

Из приведенных в таблице данных видно, что максимальные суточные изменения величины A , которые являются характерными также для большей части территории II климатической зоны страны, превышают 20°C , а для регионов I климатической зоны эти колебания величины A в полтора раза больше.

Таким образом, на многих территориях нашей страны наблюдаются значительные циклические колебания температуры наружного воздуха, что указывает на необходимость проектирования наружных ограждающих конструкций с достаточными теплозащитными качествами и тепловой инерцией. Этими качествами отличаются разработанные в ФГБОУ ВО «ПГУАС» конструктивные решения наружных ограждений на основе полученных модификаций теплоизоляционных ячеистых бетонов и тяжелых композитов (рис. 3) [5, 6].



Теплоемкость C , $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для массива конструкций с положительной температурой

80,6	138,6	157,4	15,8
3,36	6,36	5,65	1,46

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности Y , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Рис. 3. Теплотехнические показатели, влияющие на тепловую инерцию и теплоаккумулирующие свойства ограждающих конструкций

(толщина слоя конструкции δ , мм, плотность материала γ , $\text{кг}/\text{м}^3$):

- 1 – ячеистый бетон, $\delta = 450$; $\gamma = 600$; 2, 3 – керамзитобетон, $\delta = 80$ и 120 , $\gamma = 1200$; 4 – ячеистый бетон, $\delta = 200$, $\gamma = 300$; 5 – тяжелый композит, $\delta = 120$, $\gamma = 4000$; 6 – цементно-песчаная штукатурка, $\delta = 30$, $\gamma = 1700$; 7 – пенополистирол, $\delta = 60$, $\gamma = 40$; 8 – керамзитобетон, $\delta = 180$, $\gamma = 1800$; 9 – листы гипсовые обшивочные, $\delta = 20$, $\gamma = 800$

Три первых конструктивных решения наружной стены из ячеистых бетонов и тяжелых композиционных материалов (см. рис. 3) имеют значительно большую теплоемкость массива, а также тепловую инерцию и теплоаккумулирующую способность

по сравнению с широко известным конструктивным решением стены из оставляемой пенополистирольной опалубки и среднего бетонного слоя.

Таким образом, основное преимущество первых трех конструкций стен заключается в том, что они обладают способностью накапливать и постепенно отдавать тепло воздуху помещений при значительной амплитуде колебаний температуры $A, ^\circ\text{C}$, воздушной среды, что случается в периоды резких похолоданий или при аварийном отключении системы отопления. В многослойных конструкциях слои из более плотных и теплоемких материалов расположены со стороны помещения (конструктивные схемы 2 и 3), что позволяет выравнивать величину $A, ^\circ\text{C}$, тем самым формируя стабильный тепловой режим помещений в зимнее время. С наружной стороны или в средней части конструкции теплоизоляционный слой с большим термическим сопротивлением обеспечивает достаточный прогрев теплоаккумулирующего слоя теплым внутренним воздухом.

Список литературы

1. Архитектурно-строительные аспекты экономии тепла в регулируемой энергосистеме жилой застройки / А.М. Береговой [и др.] // Известия Вузов. Строительство. – 2004. – № 7. – С. 91–97.
2. Береговой, А.М. Энергосбережение в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой // Жилищное строительство. – 2002. – № 5. – С. 4–6.
3. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. – М.: ГУПЦПП, 2000. – 57 с.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 12. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.
5. Пенобетон. Состав, свойства, применение / А.П. Прошин [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2003. – 165 с.
6. Береговой, В.А. Жаростойкие пенобетоны / В.А. Береговой, Н.А. Прошина, Е.В. Королев. – Пенза: ПГУАС, 2007. – 111 с.

References

1. Architectural aspects of heat saving in a regulated power system for residential buildings / A.M. Beregovoy [etc.] // News of higher educational institutions. Construction. – 2004. – № 7. – P. 91–97.
2. 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.
3. SNIP 23-01-99. Construction climatology / Gosstroy, Russia. – M.: GUPTSP. – 57 p.
4. Sciences applied Handbook on USSR climate. Ser.3. Data of many years. P. 1–6. Number 12. – L.: Gidrometeoizdat, 1988.
5. Foam concrete. Composition, properties, application / A.P. Proshin [etc.]. – Penza: PGUAS, 2003. – 165 p.
6. Beregovoy, V.A. Heat resistant foam concrete / V.A. Beregovoy, N.A. Proshin, E.V. Korolev. – Penza: PGUAS, 2007. – 111 p.

УДК 624.042.1

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

Артюшин Дмитрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

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

Коновалов Павел Владимирович,
магистрант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Artyushin Dmitriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

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

Konovalev Pavel Vladimirovich,
Undergraduate

МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ СУПЕРКОРОТКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.В. Артюшин, Н.Н. Ласьков, П.В. Коновалов

Приводятся результаты экспериментально-аналитических исследований сопротивления срезу железобетонных конструкций. Рассмотрены особенности напряженно-деформированного состояния коротких и суперкоротких элементов при срезе. Выявлен характер сопротивления срезу суперкоротких железобетонных конструкций. Разработан единый подход к моделированию сложной работы железобетонных конструкций с малым относительным пролетом среза на основе аналоговых стержневых моделей среза.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, пролет среза, суперкороткие элементы, методы расчета, аналоговые стержневые модели

MODELS OF SHEAR STRENGTH OF SUPERSHORT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

D.V. Artyushin, N.N. Laskov, P.V. Konovalev

Results of experimental and analytical researches of shear strength of reinforced concrete structures are given. The features of tensely deformed condition of short and supershort elements at a shear are considered. The character of strength to a shear of supershort reinforced concrete constructions is revealed. A uniform approach to modeling complex work of reinforced concrete structures with small span of shear on the basis of analog rod models is developed.

Keywords: reinforced concrete structures, span of shear, supershort elements, analog rod models, calculation method

Актуальной проблемой проектирования строительных конструкций является совершенствование нормативных методов их расчета [1, 2]. При проектировании железобетонных конструкций особое значение имеет проблема оценки прочности и деформативности конструкций с малым относительным пролетом среза, работающих в условиях сложного напряженного состояния.

Под относительным пролетом среза понимают геометрическую характеристику бетонного или железобетонного элемента, определяемую соотношением длины пролета среза a и рабочей высоты конструкции h_0 и выделяющую классы коротких и суперкоротких элементов. К классу коротких элементов относятся конструкции с

отношением $a/h_0 \leq 1,0 \div 1,5$; суперкоротких – $a/h_0 \leq 0,25 \div 0,5$. Недостаточные экспериментальные и теоретические исследования работы указанных элементов являются причиной отсутствия эффективной нормативной методики их расчета. В этих условиях применение численных методов расчета, не описывающих в полной мере действительный характер напряженного состояния рассчитываемых конструкций, дает большие отклонения расчетных и фактических величин разрушающих усилий и не всегда обеспечивает безопасность зданий в целом.

Главной особенностью напряженно-деформированного состояния (НДС) коротких и суперкоротких железобетонных конструкций является образование полей концентрации главных напряжений в наклонных полосах бетона и горизонтальных поясах на участках между грузовыми и опорными, а также между опорными площадками. В связи с этим при совершенствовании методов расчета железобетонных элементов с малым относительным пролетом среза перспективной является методика расчета элементов и конструкций по их аналоговым стержневым моделям (АСМ). Она основана на копировании полей концентрации напряжений и позволяет наиболее точно описать физическую работу элементов в зоне действия поперечных сил, а также максимально эффективно использовать материал в сопротивлении конструкций. Метод расчета железобетонных конструкций, базирующийся на указанной методике, включен в СНиП 52-01–2003 и в настоящее время активно развивается с учетом изменения НДС в различных конструкциях [3–7].

В рамках изучения работы железобетонных элементов на действие поперечных сил в ПГУАС проводятся специализированные исследования сопротивления бетона и железобетона срезу [8]. Актуальность данного направления подтверждается характером сопротивления и разрушения коротких и суперкоротких элементов, определяемым взаимным влиянием нормальных и касательных напряжений, а также развитием продольных и поперечных деформаций. Работа направлена на изучение механизма сопротивления и разрушения конструкций по сечению среза с помощью моделирования. Использование математического и физического моделирования работы данных элементов обосновывается возможностью адаптации модели к каждой конкретной конструкции, при этом учитываются основные принципы сложного сопротивления срезу.

Исследование механизма среза базируется на изучении сопротивления эталонных бетонных образцов среза (призм с зонами удаления бетона), а также суперкоротких балок с относительным пролетом среза $0 < a/h_0 < 0,5$. При определении формы эталонного образца были исследованы четыре различных образца в форме куба, призмы, бруса и призмы с зонами удаления бетона. Анализ результатов проведенных испытаний с моделированием сопротивления образцов посредством каркасно-стержневой модели (КСМ- τ) позволил определить и обосновать оптимальную форму эталонного образца среза в виде призмы с зонами удаления бетона (рис. 1).

Особенность геометрической формы эталонного образца заключается в удалении объемных областей бетона в его верхней и нижней частях. Таким образом, на образец накладываются условия ограничения деформаций и распределения напряжений. Возможность относительного смещения двух частей образца по вертикальному сечению сдвига приводит к тому, что образец работает только на срез вплоть до полного разрушения.

Основное внимание при исследовании работы эталонных образцов уделялось выявлению особенностей сопротивления сдвигу и основанному на них построению расчетной каркасно-стержневой модели (КСМ- τ), позволяющей оценить прочность образца на срез. Работа включала анализ результатов ранее проведенных испытаний железобетонных элементов в форме призмы с зонами удаления бетона [9]. Аналоговая стержневая модель (АСМ- τ) образца показана на рис. 2.

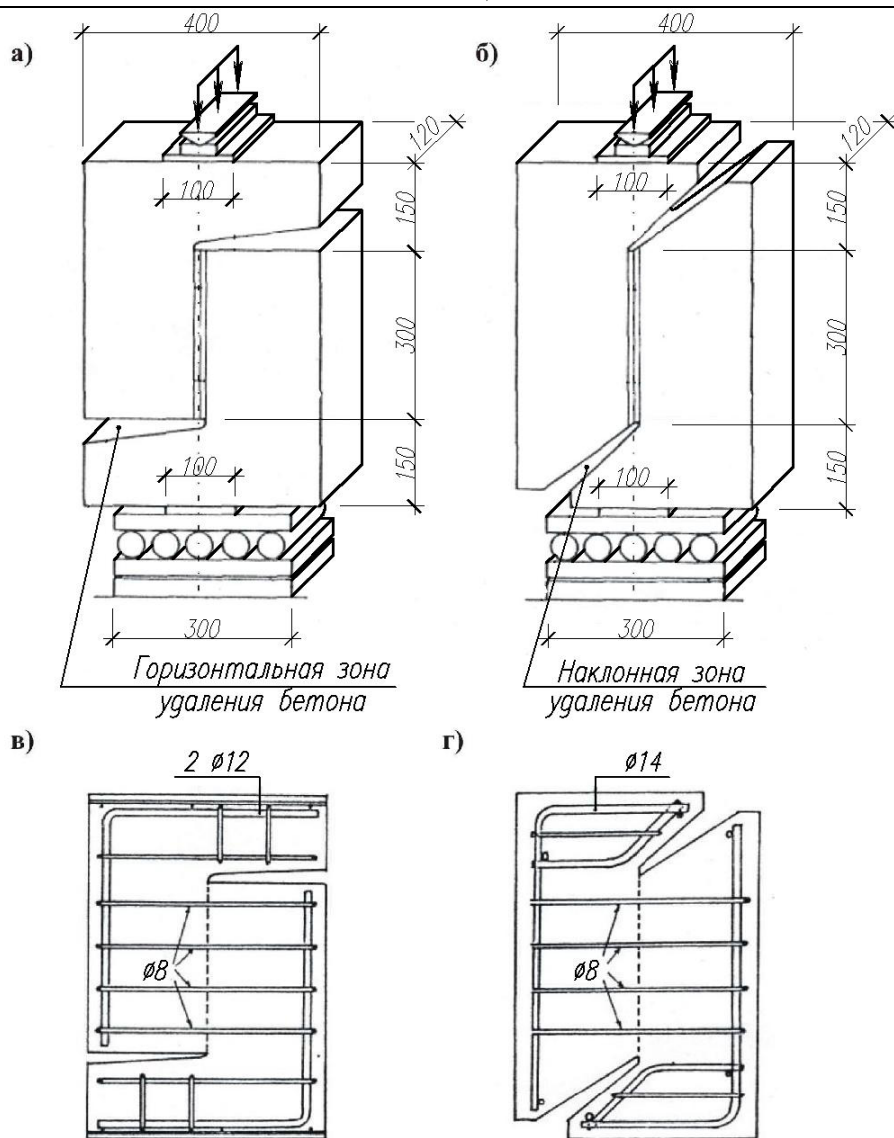


Рис. 1. Конструктивное решение и схема нагружения эталонных железобетонных образцов:
а, б – образцы с горизонтальной и наклонной зонами удаления бетона;
в, г – схемы армирования образцов

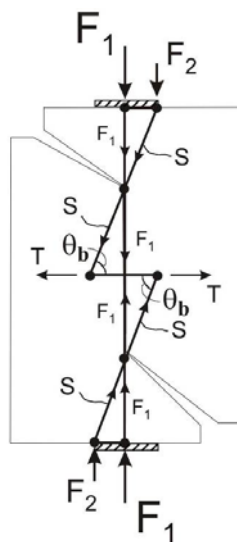


Рис. 2. Аналоговая стержневая модель среза (АСМ-τ)

В основе экспериментально-аналитических исследований лежит гипотеза, предполагающая формирование прочности эталонного образца в зоне среза на разных стадиях его сопротивления усилиям сдвига, продольным и поперечным деформациям (касательным и нормальным напряжениям), а также силам трения и зацепления бетона в трещине. В результате испытаний получены зависимости нормальных и касательных напряжений в сечении сдвига при изменении различных факторов, таких, как процент поперечного армирования, диаметр арматуры, схема армирования, класс бетона. На рис. 3 приведены графики изменения касательных напряжений при изменении прочности бетона и процента армирования.

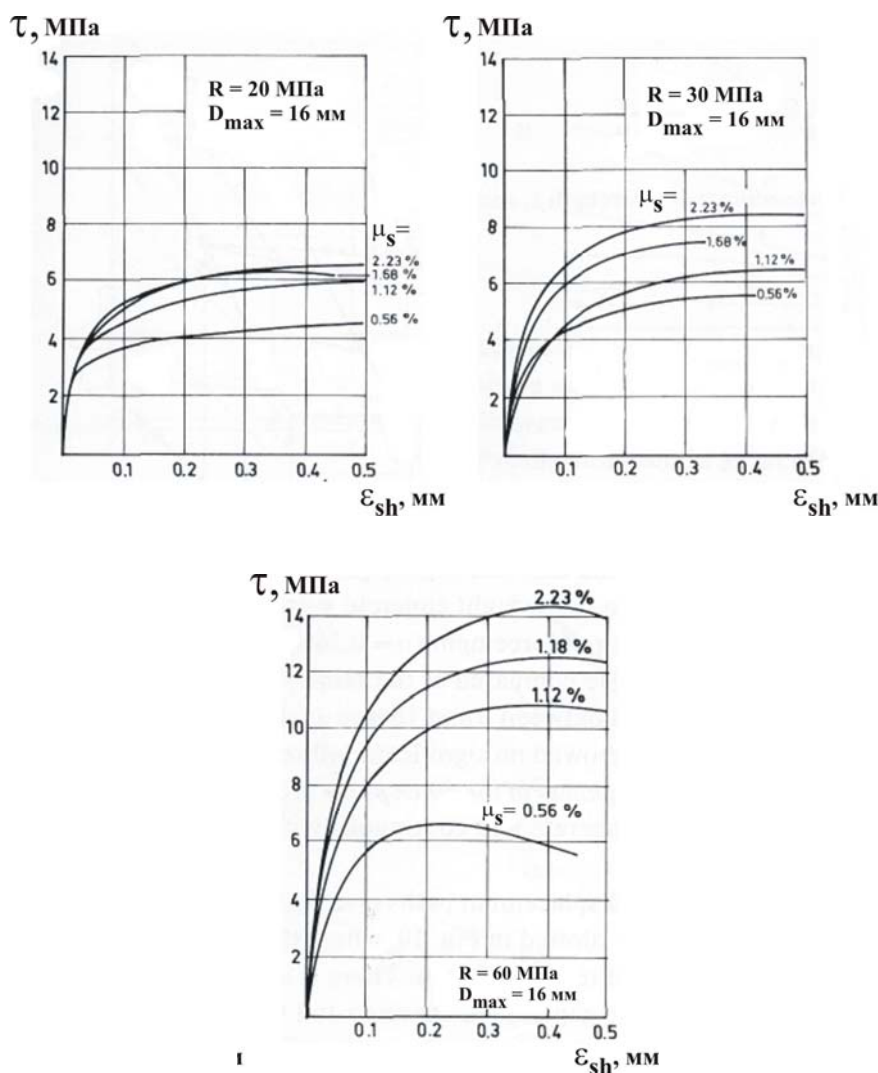


Рис. 3. Зависимости касательных напряжений и деформаций сдвига (τ - ϵ_{sh}) в бетоне образцов при изменении прочности бетона и процента армирования поперечной арматурой

На основе полученных результатов выявлены характерные особенности сопротивления образцов для их реализации при построении каркасно-стержневой модели среза элемента. Такими особенностями являются одновременная работа арматуры в продольном (вдоль линии сдвига) и поперечном направлениях, а также нагельный эффект арматуры. В железобетонном образце характер сопротивления зависит от значений продольных и поперечных деформаций образца.

Программа экспериментальных исследований суперкоротких балок включала в себя две серии испытываемых образцов (рис. 4). Исследуемыми факторами являлись процент армирования горизонтальными хомутами и размеры грузовых площадок.

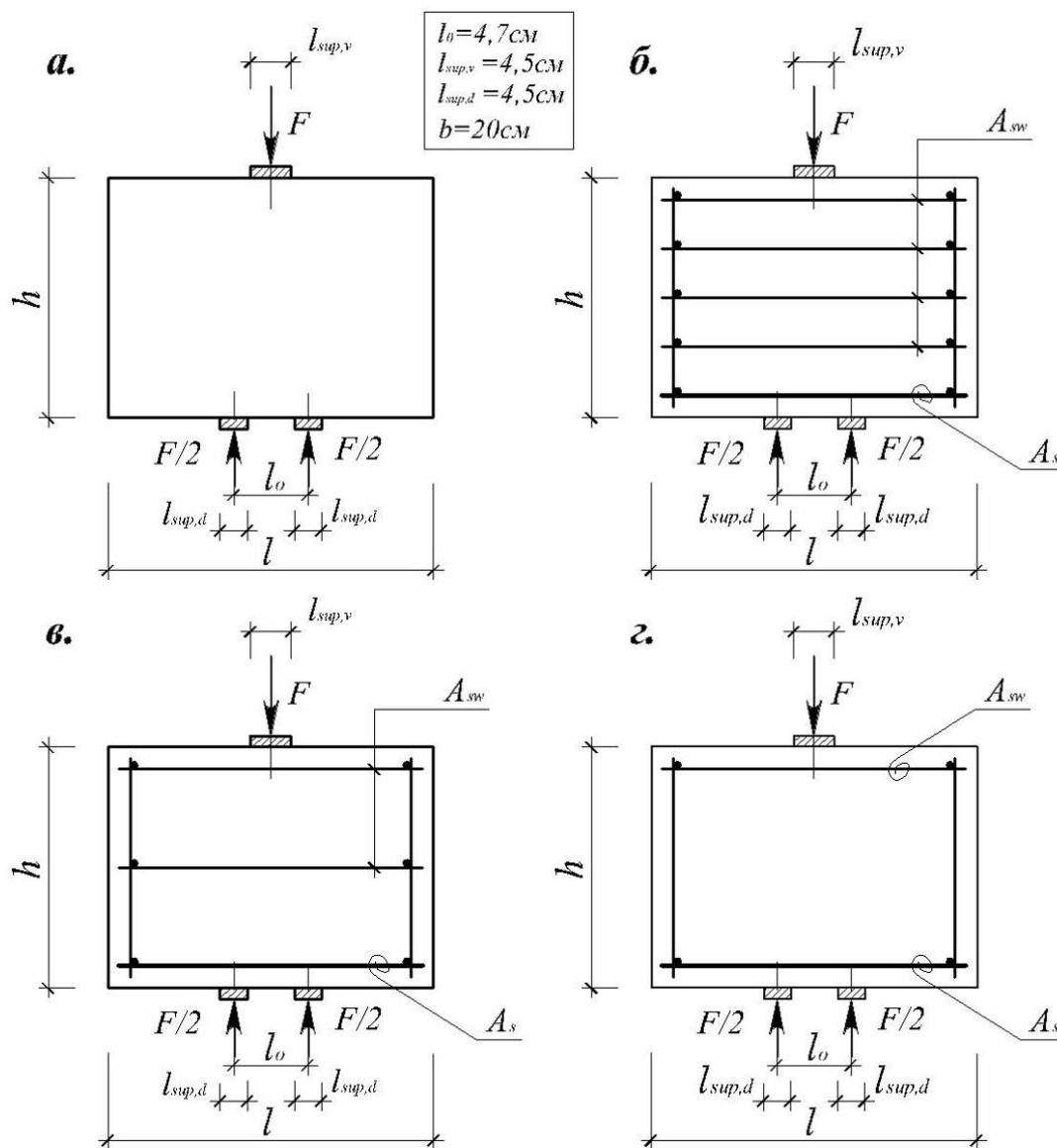


Рис. 4. Схемы армирования образцов суперкоротких балок для испытания на действие сосредоточенных сил:

а – бетонный образец; б, в, г – схемы армирования образцов продольной и поперечной (горизонтальной) арматурой

Разрушение суперкоротких балок квалифицируется как срез сжатых наклонных полос бетона по коротким диагоналям. Предельным состоянием расчетного сечения испытанных балок является достижение максимальными касательными напряжениями предельных значений $\tau_u = \gamma_\tau R_{bt}$ (рис. 5). Результаты испытаний показали возрастание величины предельных касательных напряжений в сечениях среза при увеличении процента армирования. Влияние размеров грузовой площадки на величину разрушающей внешней нагрузки в данном случае носит локальный характер и осуществляется повышением прочности бетона в зоне грузовой площадки при увеличении ширины наклонных расчетных полос бетона в верхней части.

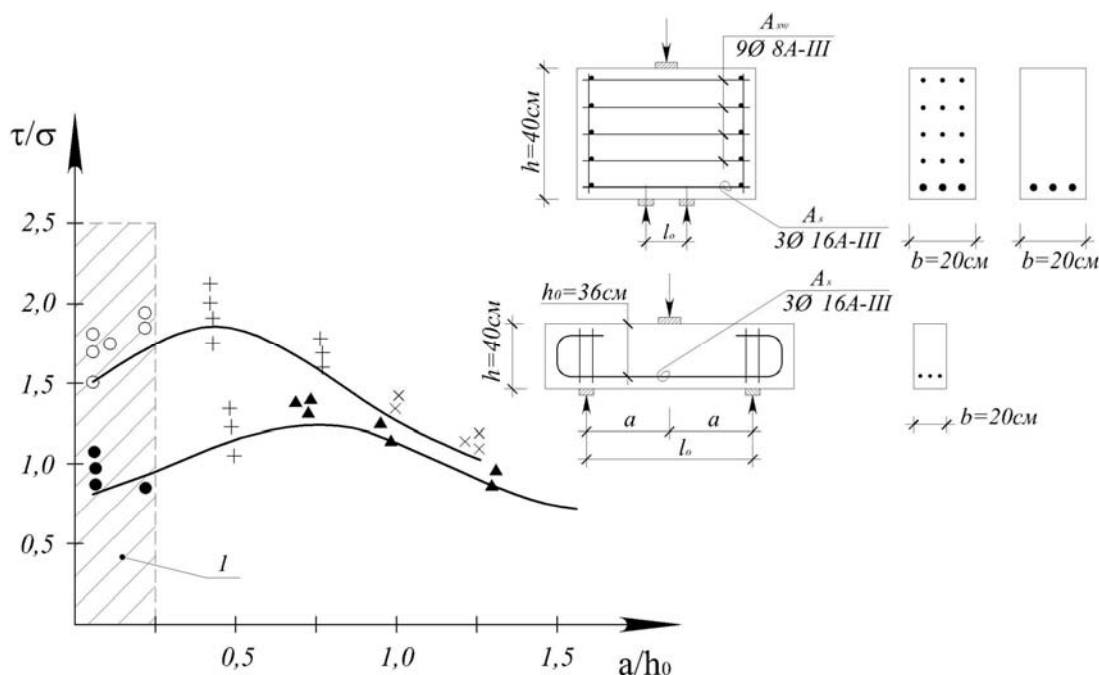


Рис. 5. Изменение предельных касательных напряжений в зависимости от относительной длины пролета среза по результатам испытаний суперкоротких балок, проведенных в ПГУАС:
1 – исследуемая зона сопротивления суперкоротких балок

Основной проблемой при оценке прочности суперкоротких балок является определение степени участия горизонтальных хомутов в сопротивлении сжатию и срезу наклонных расчетных полос суперкоротких балок. Для решения данной проблемы предлагается использовать критерий оценки сопротивления косвенной арматуры. Принципиальный подход к расчету данной арматуры, расположенной под углом к осям расчетных наклонных полос бетона суперкоротких балок, заключается в обязательной оценке выполнения арматурой двух функций – сопротивления развитию деформаций продольного укорочения бетона сжатых полос и сопротивления развитию поперечных деформаций удлинения бетона расчетных полос.

Главная особенность при построении модели среза суперкороткой балки, представленной на рис. 6, заключается в том, что исходная модель каркасно-стержневой модели (КСМ) дополняется диагональными стержнями, имитирующими срез наклонной полосы. При этом не рассматриваются стержни, ранее имитировавшие в КСМ боковые грани полосы. Таким образом, новая модель КСМ-т образуется путем замены каждого наклонного стержня в модели КСМ двумя наклонными X-образными стержнями, расположенными по направлению диагональных сечений среза сжатой бетонной полосы. Модель системы формируется по аналогии с фермой из симметрично расположенных относительно вертикальной оси стержней, в которых возникают растягивающие усилия среза S_{τ} , воспринимаемые одновременно бетоном и поперечной арматурой сжатых полос.

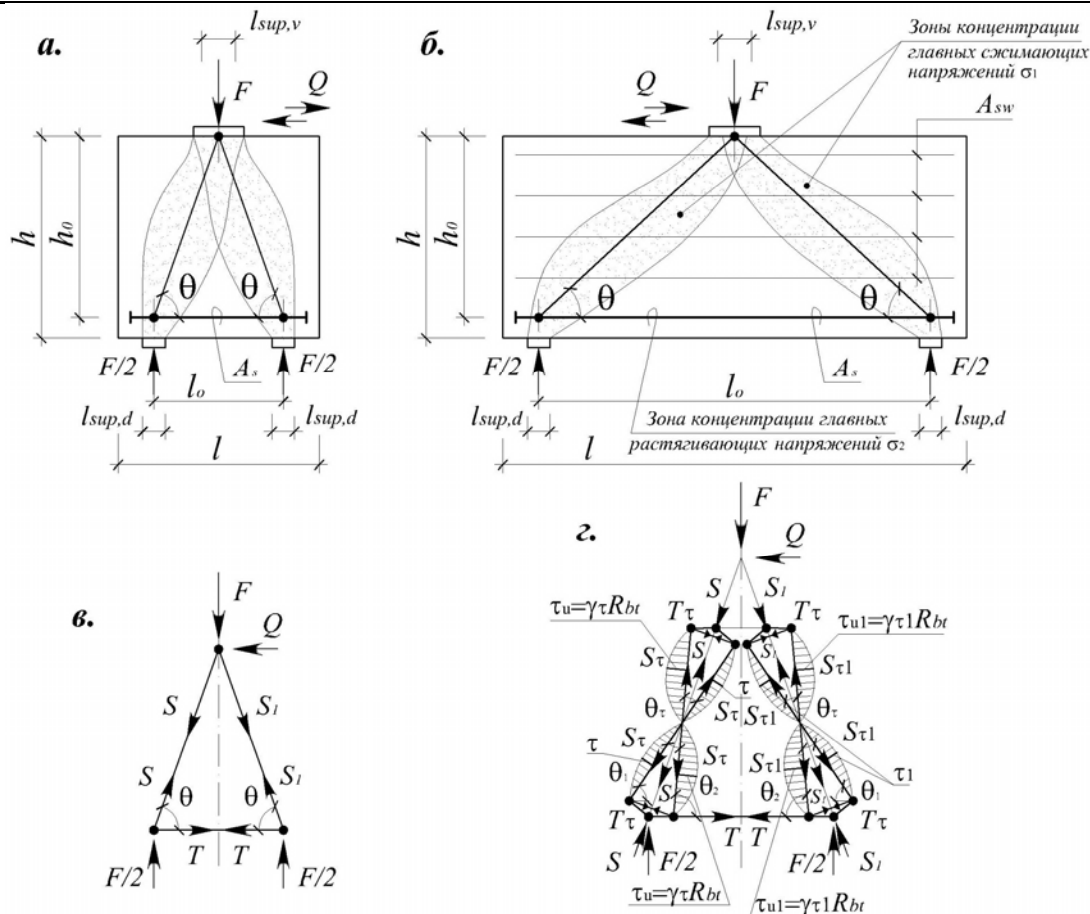


Рис. 6. Суперкороткая балка:

а – схема сопротивления суперкороткой балки; б – схема сопротивления короткой балки;
в (г) – аналоговая стержневая (каркасно-стержневая) модель суперкороткой балки

Выводы

1. Показана целесообразность использования представленных аналоговых стержневых и каркасно-стержневых моделей при совершенствовании методов расчета железобетонных элементов с малым относительным пролетом среза.

2. Приведены усовершенствованные расчетные модели среза, в которых осуществляется имитация сечений сдвига путем введения дополнительных стержней и которые обеспечивают единый подход к моделированию сложной работы коротких элементов (призм, кубов и брусьев) с относительным пролетом среза $a/h_0 = 0$, а также суперкоротких балок с пролетом среза $a/h_0 < 0,5$.

Список литературы

1. Баранова, Т.И. Совершенствование метода расчета монолитных узлов сопряжения железобетонных балок на основе аналоговых расчетных стержневых моделей / Т.И. Баранова, Д.В. Артюшин, А.И. Агуреев // Academia. Архитектура и строительство. – 2007. – №1. – С. 74–78.
2. Артюшин, Д.В. Экспериментально-аналитические исследования монолитных узлов сопряжения железобетонных балок / Д.В. Артюшин, В.А. Шумихина, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – С. 15.
3. Баранова, Т.И. Развитие экспериментальной базы аналоговых моделей узлов сопряжения колонн и балок монолитных каркасов / Т.И. Баранова, В.А. Новиков, Д.В. Артюшин // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2005. – №9. – С. 67.

4. Баранова, Т.И. Экспериментальная теория сопротивления срезу суперкоротких балок и интенсивно армированных железобетонных элементов / Т.И. Баранова, Д.В. Попов // Academia. Архитектура и строительство. – 2007. – №2. – С. 69–74.
5. Комаров, В.А. Расчетные модели сжатых полос бетона консольных опор ригелей многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, С.Н. Ласьков, Н.Н. Ласьков // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №3(24). – С. 43–48.
6. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Т. 8, №5-8. – С. 219–225.
7. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Т. 8, №9. – С. 441–445.
8. Баранова, Т.И. Сопротивление срезу суперкоротких железобетонных балок / Т.И. Баранова, Д.В. Артюшин, Д.В. Попов // Магистры – будущая кадровая основа строительной отрасли: сб. ст. Международной научно-методической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2009.
9. Walraven, J.C. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading / J.C. Walraven, H.W. Reinhardt // Heron-Journal. – 1994. – Т. 26.

References

1. Baranova, T.I. Improvement of a method of calculation of monolithic knots of interface of reinforced concrete beams on the basis of analog settlement rod models / T.I. Baranova, D.V. Artyushin, A.I. Agureev // Academia. Architecture and construction. – 2007. – №1. – P. 74–78.
2. Artyushin, D.V. Experimental and analytical researches of monolithic knots of interface of reinforced concrete beams / D.V. Artyushin, V.A. Shumikhina, Ya.A. Azimova // Modelling and mechanics of designs. – 2016. – №3. – P. 15.
3. Baranova, T.I. Development of experimental base of analog models of knots of interface of columns and beams of monolithic frameworks / T.I. Baranova, V.A. Novikov, D.V. Artyushin // Bulletin of the Office of construction sciences of the Russian academy of architecture and construction sciences. – 2005. – №9. – P. 67.
4. Baranova T.I. The experimental theory of strength to shear of supershort beams and intensively reinforced concrete elements / T.I. Baranova, D.V. Popov // Academia. Architecture and construction. – 2007. – №2. – P. 69–74.
5. Komarov, V.A. Calculated models of compressed concrete strips of cantilever supports of crossbars of multi-storey frameworks / V.A. Komarov, S.N. Laskov, N.N. Laskov // Regional architecture and engineering. – 2015. – №3(24). – P. 43–48.
6. 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.
7. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, №9. – P. 441–445.
8. Baranova, T.I. Strength to shear of supershort reinforced concrete beams / T.I. Baranova, D.V. Artyushin, D.V. Popov // Masters – the future personnel base of the construction industry: a collection of articles of the International Scientific and Methodological Conference. – Penza, PGUAS, 2009.
9. Walraven, J.C. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading / J.C. Walraven, H.W. Reinhardt // Heron-Journal. – 1994 – Vol. 26.

УДК 624.131.524.4

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Глухов Вячеслав Сергеевич,
кандидат технических наук,
профессор кафедры «Геотехника
и дорожное строительство»
E-mail: info@novotech.ru

Глухова Мария Вячеславовна,
аспирант
E-mail: glukhova.mary@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

Glukhov Vyacheslav Sergeevich,
Candidate of Sciences,
Professor of the department «Geotechnics
and Road Construction»
E-mail: info@novotech.ru

Glukhova Mariya Vyacheslavovna,
Graduate student
E-mail: glukhova.mary@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ОСАДКИ ЛЕНТОЧНОГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

В.С. Глухов, М.В. Глухова

На примере строящегося 28-этажного жилого дома рассмотрен проект ленточного свайного фундамента из составных призматических свай. В традиционной постановке для ленточного четырехрядного свайного фундамента расчетная осадка значительно превысила предельно-допустимое значение деформации. Предложен вариант оптимизации осадки по результатам расчета свай с переменной длиной.

Ключевые слова: свайные ленточные фундаменты, деформация основания, осадка, взаимовлияние свай, несущая способность, предельные деформации

SETTLEMENT OPTIMIZATION OF PILE-TAPE FOUNDATIONS

V.S. Glukhov, M.V. Glukhova

During the construction of a 28-story residential house, a pile-tape foundation with composite prismatic piles was constructed. In a traditional setting the design scheme significantly exceeded the limit deformation value for a four-row pile foundation. The pile-tape foundation variant of variable pile lengths is offered. The problem of settlement optimization was solved by selecting a pile lengths combination.

Keywords: pile-tape foundations, base deformation, settlement, pile-to-pile influence, pile capacity, ultimate strain

При строительстве в г. Самаре 28-этажного жилого дома на сплошной монолитной железобетонной плите фактические деформации основания более чем в 2,5 раза превысили предельно-допустимое значение. При этом имело место развитие крена здания.

В качестве мероприятий по уменьшению указанных деформаций выполнены работы по закреплению грунтового основания в пределах 5–6 м ниже подошвы плиты. В результате появилась тенденция к стабилизации осадки и крена.

При возведении следующих двух подъездов указанного дома (рис. 1) был разработан вариант ленточных свайных фундаментов из традиционных призматических составных свай сечением 30×30 см. Исходя из характера напластования грунтов, оптимальная длина свай составляет 17,0–19,0 м.

Под наиболее нагруженные средние стены лента свайного фундамента по ширине принята из четырех свай. Расчет по деформации показал, что расчетная осадка такого ленточного фундамента при длине свай 19,0 м составляет $S = 28,8$ см, что превышает нормативное предельно-допустимое значение осадки $S_u = 15,0$ см.

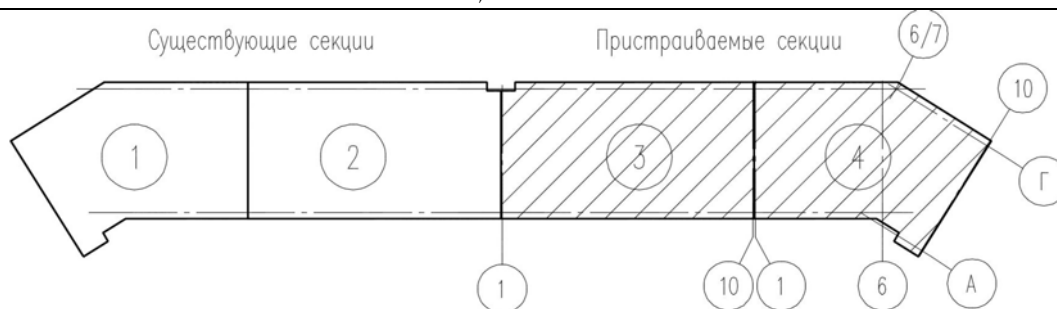


Рис. 1. План секций возводимого здания

На основании ранее выполненных исследований [1, 2] авторами рассмотрена возможность использования варианта разноуровневого расположения подошвы условного свайного фундамента с целью уменьшения расчетной величины осадки. Выполнены проверочные расчеты ленточных фундаментов из свай переменной длины.

Авторы разбили сваи на отдельные ряды, располагая сваи С-1 и С-2 по четыре штуки в ряду (рис. 2). Таким образом сформировалась лента в виде уступов с разницей свай по длине в 2,0 м.

Расчет указанных свай фундамента осуществляли по схеме кустов по четыре сваи в каждом. При расположении свай на расстоянии $c = 1,0$ м между осями размеры подошвы условного фундамента в поперечном направлении ленты – 5,0 м, в продольном – 1,0 м.

Авторами выполнены исследования взаимовлияния на расчетную осадку изменений соотношения длин свай соседних кустов [3, 4]. Расчет осадки кустов из свай переменной длины выполняется с использованием расчетной схемы грунтового основания в виде линейно-деформируемого полупространства методом послойного суммирования деформаций слоев в пределах сжимаемой толщи [5, 6].

В результате расчетов определена оптимальная разница длин $\Delta h_{\text{опт}}$, при которой величина максимальной осадки $S_{\text{max}} = 148,0$ мм, что не превышает $S_u = 150,0$ мм. При этом $\Delta h_{\text{опт}} = 2,0$ м, а длины свай составляют: С-1 – 17,0 м, С-2 – 19,0 м.

Выделены три характерные осадки. Для крайнего куста $S_{\text{кр}} = 86,0$ мм. Минимальная осадка $S_{\text{min}} = 104,0$ мм соответствует кусту из относительно коротких свай С-1. Максимальное значение осадок отмечается для более длинных свай С-2 и составляет $S_{\text{max}} = 148,00$ мм.

Так как в целом ленточный свайный фундамент из свай различной длины объединяет монолитный ростверк, следовательно, осредненное значение осадки составляет порядка 128,0 мм (рис. 2, в).

В целом изменение расчетной схемы ленточного фундамента на схему работы отдельных кустов свай позволяет существенно уменьшить толщину активной зоны сжатия грунтового основания под подошвой условного свайного фундамента, что обуславливает существенное уменьшение расчетной осадки. В рассматриваемом случае указанная осадка для ленточных фундаментов из свай одинаковой длины составила 28,8 см, а кустов из свай переменной длины $S_{\text{max}} = 14,8$ см.

В связи со стесненными условиями строительства предусмотрена технология погружения свай путем вдавливания. При такой технологии несущая способность свай обеспечивается достижением контрольного (конечного) усилия вдавливания N_k на завершающем этапе погружения. На этапе проектирования коэффициент перехода от расчетно-допускаемой нагрузки $N_{\text{рд}}$ к контрольному усилию вдавливания принят равным 1,2. Конечное усилие $N_k = N_{\text{рд}} \times 1,2 = 500,0 \text{ кН} \times 1,2 = 600,0 \text{ кН}$.

В случае, когда контрольное усилие меньше указанного выше, необходимо повторно выполнить проверку контрольного усилия после «отдыха» сваи продолжительностью 2,0 часа. Если и после «отдыха» $N_k < 600,0 \text{ кН}$, необходимо провести статические испытания сваи в соответствии с ГОСТ 5686-2012. На основании результатов испытаний следует принять решение о вдавливании дополнительных свай.

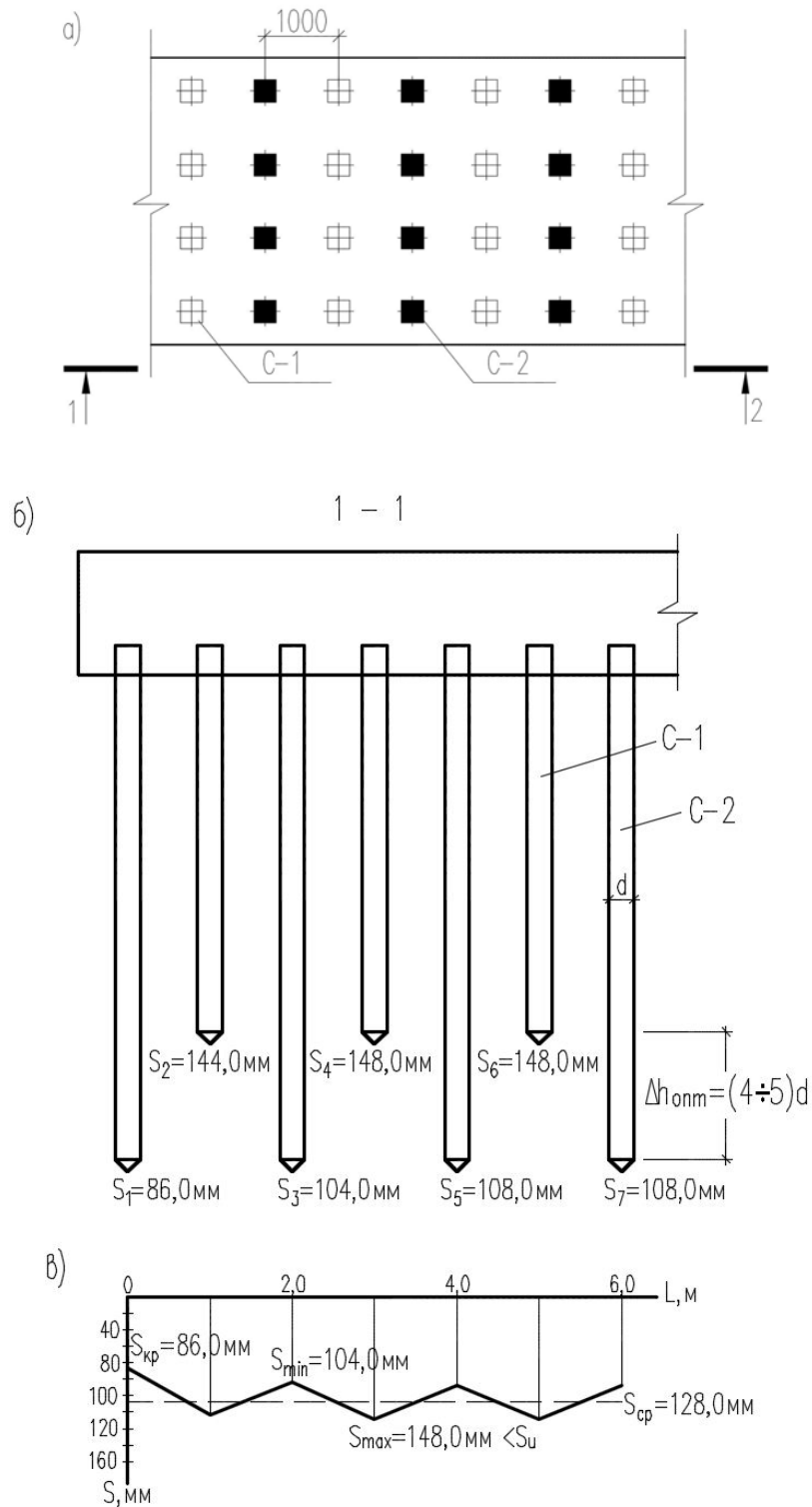


Рис. 2:

а – план расположения свайных рядов C-1, C-2 в ленте фундамента; б – разрез 1-1;
в – график зависимости осадки S от разницы длин свай Δd

Согласно отчету по изысканиям в качестве несущего слоя свай служит глина тугопластичная (ИГЭ-4), характеристики которой приведены в таблице.

	ИГЭ-4
Удельный вес	$\gamma=20,0 \text{ кН/м}^3$
Удельное сцепление	$c=31 \text{ кПа}$
Угол внутреннего трения	$\varphi=18^\circ$
Модуль деформации	$E=18 \text{ МПа}$
Показатель текучести	$IL=0,28$

С целью обеспечения надежной работы фундаментов при эксплуатации проектом предусмотрены статические испытания шести опытных свай. Загружение осуществлялось гидравлическими домкратами грузоподъемностью 200 т путем упора домкрата в грузовую платформу (рис. 3). Контроль за перемещением опытного фундамента велся с помощью двух прогибомеров. Таким образом, решалась задача определения длины свай, при которой обеспечивается расчетно-допускаемая нагрузка на сваю $N_{рд}=500 \text{ кН}$. В ходе испытаний сваи погружались до достижения контролируемого усилия при вдавливании порядка $N_k=600\div620 \text{ кН}$ [7].

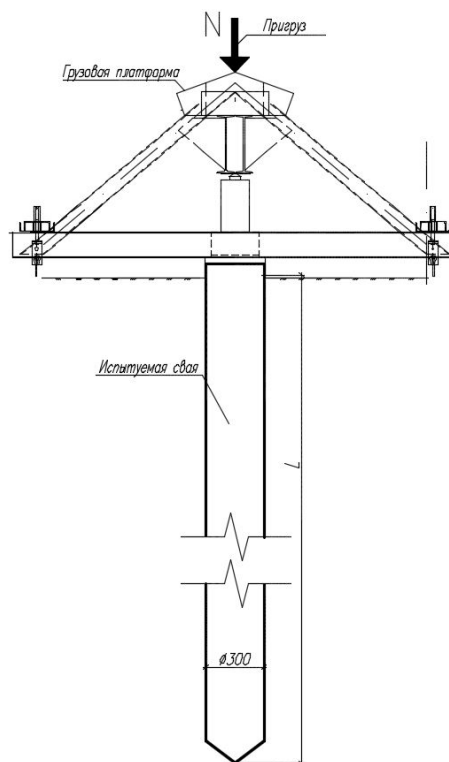
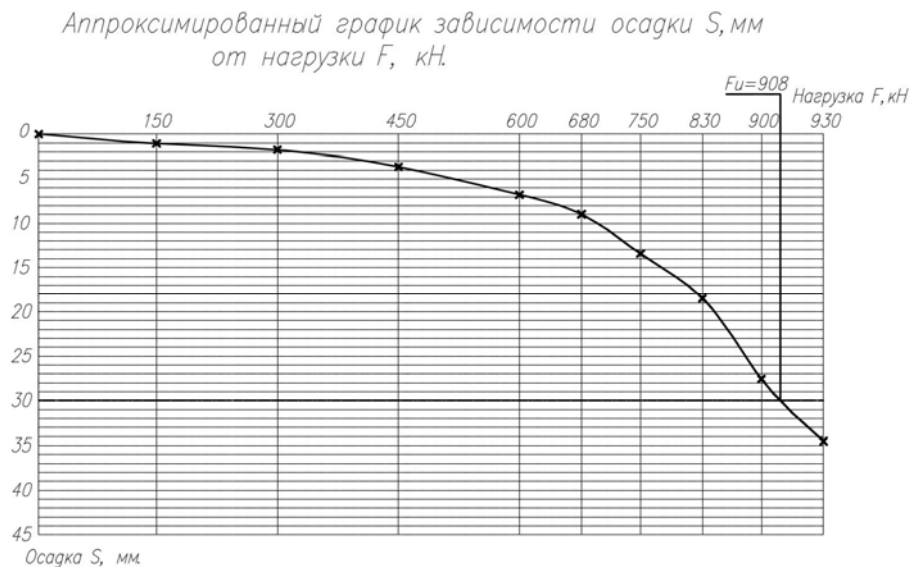


Рис. 3. Схема статического испытания свай

Усилия вдавливания фиксировались с момента погружения сваи на глубину 4,0 м. Последнее обусловлено наличием в пятне застройки секций слоя просадочного суглинка (ИГЭ-2) мощностью около 4,0 м. Для исключения влияния при замачивании просадочного слоя на несущую способность сваи до вдавливания устраивались лидерные скважины диаметром 450 мм.

По результатам вдавливания свай построен осредненный график зависимости усилия вдавливания F от глубины погружения сваи L . Значения усилий вдавливания при одинаковой глубине погружения свай отличаются в пределах 5 %. Это позволяет сделать вывод об однородности грунтовых условий. Также по данным перемещения свай относительно неподвижных реперов построены графики зависимости осадки сваи S от нагрузки F (рис. 4).

Рис. 4. График зависимости осадки сваи S от нагрузки F

При проведении испытаний были достигнуты средняя осадка 31,17 мм и максимальная нагрузка на сваю 680,0 кН. Указанная нагрузка в 1,36 раза превышает расчетно-допускаемую $N_{рд} = 500,0$ кН. За частное значение предельного сопротивления сваи F_u вдавливающей нагрузке принята нагрузка, под воздействием которой фундамент получает осадку S .

$$S = \zeta \cdot S_{u,mt},$$

где $S_{u,mt}$ — предельно допускаемая осадка для данного типа здания, принимаемая согласно нормативам равной 150,0 мм; ζ — реологический коэффициент, учитывающий отличие условий кратковременных испытаний от условий работы фундамента в процессе эксплуатации, $\zeta = 0,2$. Таким образом,

$$S = 0,2 \times 150 = 30,0 \text{ мм.}$$

Фактическое значение осадки составило 30,0 мм при нагрузке 665,0 кН. В запас прочности указанную нагрузку принимаем за величину частного значения предельного сопротивления сваи.

Расчетно-допускаемая нагрузка на фундамент по грунту основания составила 554,0 кН для свай длиной 19 м.

Путем подбора сочетания длин свай удалось осуществить оптимизацию расчетной осадки ленточного свайного фундамента с 288,0 мм до 128 мм в пределах допустимых значений для рассматриваемого типа зданий. Это обусловлено переводом схемы работы основания под ленточным фундаментом в условия работы основания под отдельностоящими кустами свай с учетом взаимовлияния при формировании разноуровневого свайного ленточного фундамента. Результаты расчета фундамента по деформациям подтверждены статическими испытаниями на площадке строительства шести опытных свай.

Список литературы

1. Глухова, М.В. Взаимовлияние плитного ростверка и свай на осадку здания / М.В. Глухова, В.С. Глухов, О.В. Хрянина // Современные научные исследования и инновации. — 2015. — №3–2(47). — С.58–62.
2. Глухов, В.С. Выравнивание осадок свай с учетом взаимовлияния / В.С. Глухов, М.В. Глухова, Т.А. Исаева // Актуальные проблемы современного фундаментострое-

ния с учетом энергосберегающих технологий: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 32–37.

3. Боков, И.А. Разработка методики расчёта и проектирования свайных оснований, в составе которых применены сваи разной длины и диаметра / И.А. Боков, В.Г. Федоровский // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 4. – С. 121–128.

4. Рузаев А.М. Оптимизация проектных решений свайных фундаментов с учетом взаимного влияния свай и работы низкого ростверка на их несущую способность: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.М. Рузаев // Московский государственный строительный университет. – М., 2010.

5. Глухова, М.В. Исследование влияния плиты ростверка на осадку свай с уширением / М.В. Глухова, Ю.С. Галова, В.С. Глухов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – №5–2(38). – С. 360–363.

6. Глухов, В.С. Исследование влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-2 (38). – С. 351а–354.

7. Глухов, В.С. Свайно-плитные фундаменты на комбинированном основании / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 229–237.

References

1. Glukhova, M.V. The mutual influence grillage slab and of piles at draft of the building / M.V. Glukhova, V.S. Glukhov, O.V. Hryanina // Modern scientific research and innovations. – 2015. – №3–2(47). – P.58–62.

2. Glukhov, V.S. The settlement equalization from pile-to-pile influence / V.S. Glukhov, M.V. Glukhova, T.A. Isaeva // Current problems of modern foundation engineering taking into account energy saving technologies: materials IV of the All-Russian scientific and practical conference. – Penza: PGUAS, 2014. – P. 32–37.

3. Bokov, I.A. Geotechnical features of piled foundations with irregular pile geometry / I.A. Bokov, V.G. Fedorovsky // Architecture and construction. – 2016. – № 4. – С. 121–128.

4. Ruzaev, A.M. Optimization of design solutions of pile foundations with account of mutual influence of piles and grillage work is low on their carrying capacity: The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences / A.M. Ruzaev // Moscow State Construction University. – М., 2010.

5. Glukhova, M.V. Research of raft foundation's plate influence on the settlement of piles with widening / M.V. Glukhova, Y.S. Galova, V.S. Glukhov // News of southwest state University. – 2011. – №5–2(38). – P. 360–363.

6. Glukhov, V.S. The study of the effect of widening of piles in punched holes on the settlement / V.S. Glukhov, O.V. Hryanina, M.V. Glukhova // News of southwest state University. – 2011. – №5–2(38). – P. 351а–354.

7. Glukhov, V.S. Slab-pile foundations on a combined basis / V.S. Glukhov, O.V. Hryanina, M.V. Glukhova // Bulletin of Perm national research Polytechnic University. Construction and architecture. – 2014. – № 2. – P. 229–237.

УДК 69.003.13

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

Смирнова Юлия Олеговна,
доцент кафедры «Экспертиза
и управление недвижимостью»

Логинова Виктория Вячеславовна,
студентка

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Smirnova Yuliya Olegovna,
Associate Professor of Department «Expertise
and real estate management»

Loginova Viktoriya Vyacheslavovna,
Student

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Ю.О. Смирнова, В.В. Логинова

Приведены результаты анализа взаимосвязи энергетических и экономических показателей различных типов зданий при осуществлении капитального ремонта многоквартирных жилых домов (МКД). Показано, что различные типы МКД нуждаются в повышении энергетической эффективности с помощью улучшения теплозащитной способности ограждающих конструкций и в комплексном их утеплении. При реализации данных мероприятий класс энергетической эффективности зданий, как показывает практика и проведенные расчеты, изменится с пониженного D (требующего реконструкции при дополнительном экономическом обосновании) на повышенный В (высокий). Отмечено, что наибольшей экономии энергии можно достичь при проведении капитального ремонта в зданиях высотой до 4 этажей.

Ключевые слова: анализ, энергетические показатели, типы зданий, капитальный ремонт, многоквартирные жилые дома

THE IMPACT OF ENERGY EFFICIENCY MEASURES ON THE THERMAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF APARTMENT HOUSES

Yu.O. Smirnova, V.V. Loginova

The analysis of interrelation of power and economic indicators of various types of buildings at of capital repairs of apartment houses is carried out. The greatest economy is reached in low buildings and buildings up to 4 floors. It is shown that these types of buildings need increase in power efficiency by means of improvement of heat-insulation ability of the protecting designs and their complex warming. Realizing of these actions the class of power efficiency of buildings (as practice and the carried-out calculations shows), changes from D (demanding reconstruction at additional economic justification) to B (high).

Keywords: analysis, economic effects, power indicators, types of buildings, capital repair, apartment houses

Введение

Развитие системы управления ЖКХ проходило в 5 этапов (начиная с 1991 г. и по настоящее время). С начала 90-х годов XX в. объем ремонта жилищного фонда составлял менее 1 %, что привело к критическому состоянию части жилого фонда, аварийности домов и невозможности восстановления некоторых жилых строений.

Исследования показывают, что уровень физического износа и объем капитального ремонта имеют стабильную тенденцию роста. В современных условиях остро стоит

вопрос о массовом проведении капитального ремонта жилого фонда страны. Существующие объёмы капитального ремонта многоквартирных домов не обеспечивают нормальных условий их эксплуатации. Капитальный ремонт дома должен проводиться в среднем один раз в 25 лет и составлять не менее 4 % от общего объема жилищного фонда.

Основная часть

Единый документ, устанавливающий соответствующие требования к капитальному ремонту, в том числе фасадов, отсутствует. При этом существует значительное количество разрозненных документов, которые или имеют рекомендательный характер, или приняты раньше 80-х годов прошлого века.

Наиболее полным документом в рассматриваемой предметной области являются Методические рекомендации по формированию состава работ по капитальному ремонту многоквартирных домов, финансируемых за счет средств, предусмотренных Федеральным законом от 21.07.2007 г. № 185-ФЗ «О Фонде содействия реформированию ЖКХ» (утверждены Фондом содействия реформированию ЖКХ 15.02.2013 г.). Следует отметить, что указанный документ носит рекомендательный характер и действует только в отношении капитальных ремонтов, проведённых до утверждения существующей системы капитального ремонта.

Согласно ВСН 58-88 (р)31 нормативный срок службы многоквартирного дома (как и его фасада) с момента сдачи (окончания капитального ремонта) составляет 15–20 лет. Вышеуказанный комплекс работ должен гарантировать сохранность дома в течение указанного срока.

Отметим, что к видам работ по капитальному ремонту многоквартирных домов в соответствии с Федеральным законом относятся: 1) ремонт внутридомовых инженерных систем электро-, тепло-, газо-, водоснабжения, водоотведения; 2) ремонт или замена лифтового оборудования, признанного непригодным для эксплуатации, при необходимости ремонт лифтовых шахт; 3) ремонт крыш; 4) ремонт подвальных помещений, относящихся к общему имуществу в многоквартирных домах; 5) утепление и ремонт фасадов; 6) установка коллективных (общедомовых) приборов учета потребления ресурсов и узлов управления (тепловой энергии, горячей и холодной воды, электрической энергии, газа); 7) ремонт фундаментов многоквартирных домов.

Однако законодательная база рассматривает энергоэффективность зданий в отрыве от эффективности городской системы энергоснабжения и их взаимного влияния, в связи с чем энергосберегающие мероприятия окупаются только за счет потребителя (экономии энергии); при этом не учитывается существенный экономический эффект, который получает муниципальная и региональная экономика от снижения капитальных вложений в генерацию энергии на ТЭЦ, районных котельных и в ее транспортировку – в тепловые и электрические сети и пр. В результате складывается ситуация, при которой все издержки, связанные с внедрением того или иного энергосберегающего мероприятия, перекладываются на потребителя, а регион получает существенный экономический эффект. При этом экономический эффект у потребителя низкий.

Кроме того, большинство эксплуатируемых на территории Российской Федерации жилых объектов не соответствуют современным нормативным требованиям к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций.

Это означает, что все здания постройки до 2000-го года не удовлетворяют современным требованиям к уровню тепловой защиты, т.е. они морально устарели и требуют реконструкции (утепления фасадов и кровли, замены наружных входных дверей и светопрозрачных ограждающих конструкций на более эффективные по тепловой защите). При этом в экономическом эффекте от применения рассматриваемого набора решений должен учитываться и потребительская составляющая – эффект для жильцов дома от экономии энергии.

Рассмотрим основные энергетические показатели некоторых многоквартирных жилых домов.

Результаты исследования

Для анализа изменения теплотребления здания нами были выбраны 3 дома.

В результате расчёта энергетического паспорта зданию *по улице Циолковского, 33 (4-этажный жилой дом 1960 года)* присвоен класс энергетической эффективности «D». Результаты расчёта показали, что за счёт реализации энергосберегающих мероприятий достигается сокращение расхода тепловой энергии на 56 % и изменение класса энергетической эффективности с D на B+. Ежегодная экономия тепловой энергии – 216,933 Гкал/год. Период окупаемости капитальных вложений наступает на 12-м году эксплуатации отремонтированного здания. Наблюдается положительное значение накопленного дисконтированного денежного потока в размере 121 692 руб. (рис. 1).

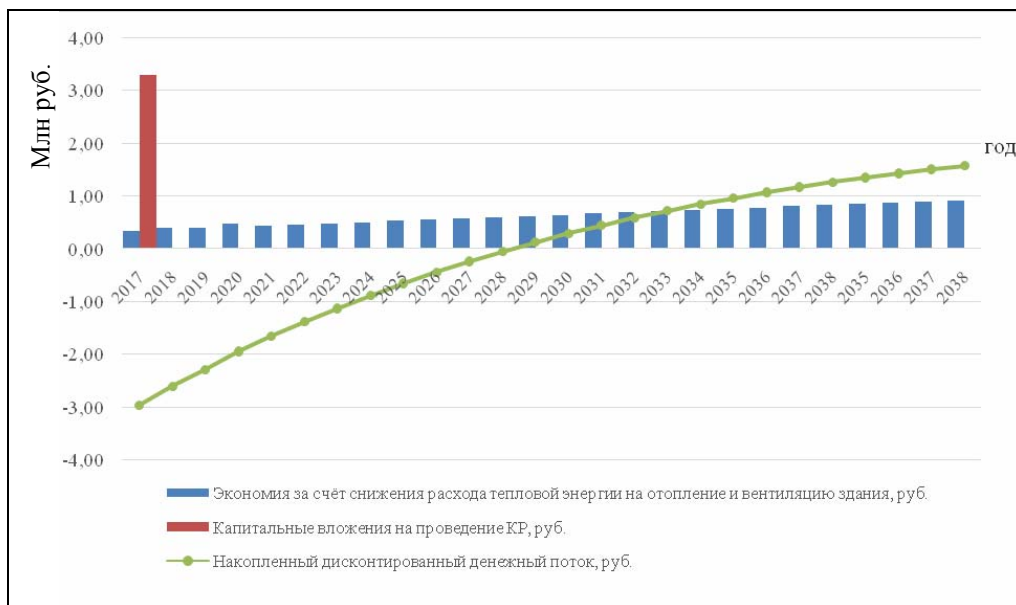


Рис. 1. Гистограмма результатов расчёта ЧДД

Следовательно, можно сделать вывод о положительном экономическом эффекте проведения КР.

Далее был рассчитан расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания *по улице Кирова, 52 (2-этажный жилой дом)* за отопительный период в двух вариантах: до ремонта фасада и после. До проведения КР расход тепловой энергии составил 173767,50 кВт·ч/год, или 149,41 Гкал/год. Результаты расчёта показали, что за счёт реализации энергосберегающих мероприятий достигается сокращение расхода тепловой энергии на 45 % и изменение класса энергетической эффективности с D на B+. Ежегодная экономия тепловой энергии – 83,07 Гкал/год.

Период окупаемости капитальных вложений наступает также на 12-м году эксплуатации отремонтированного здания. Положительное значение накопленного дисконтированного денежного потока составляет 566 718,08 руб. (рис. 2).

Также был рассчитан расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию 3-этажного жилого дома *по улице Шмидта/Комсомольская, 5/10* за отопительный период в двух вариантах: до ремонта фасада и после. До проведения КР расход тепловой энергии составлял 350 366,03 кВт·ч/год, или 387,977 Гкал/год. Результаты расчёта показали, что за счёт реализации энергосберегающих мероприятий достигается сокращение расхода тепловой энергии на 73 % и изменение класса энергетической эффективности с D на B. Ежегодная экономия тепловой энергии составит 220,08 Гкал/год.

Период окупаемости капитальных вложений наступает на 21-м году эксплуатации отремонтированного здания. К 37-му году эксплуатации наблюдается положительное значение накопленного дисконтированного денежного потока в размере 38 624,93 руб. (рис. 3).

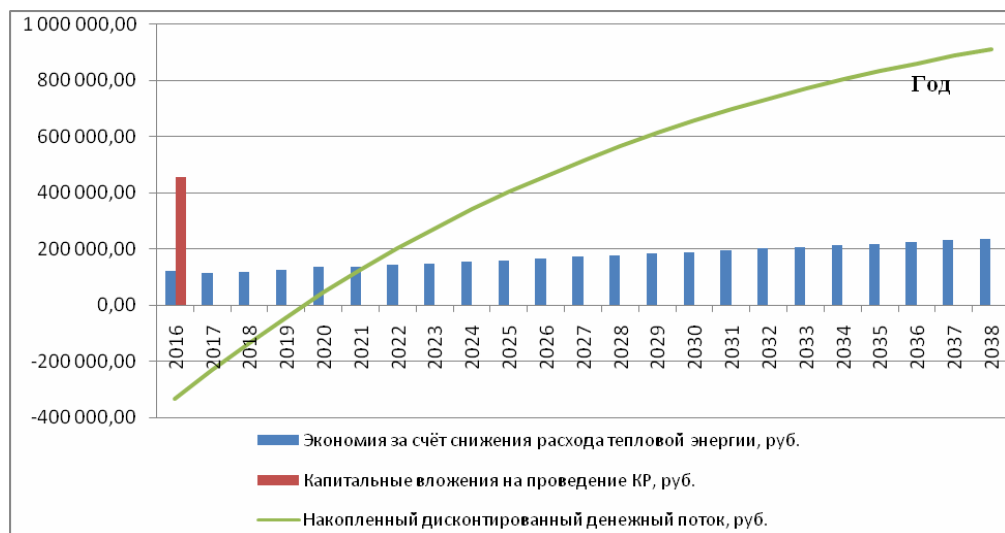


Рис. 2. Гистограмма результатов расчёта ЧДД

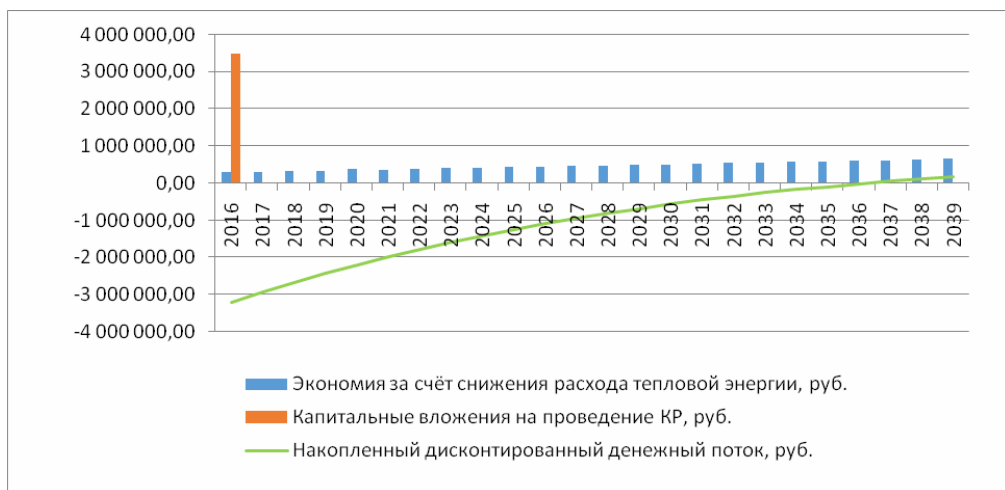


Рис. 3. Гистограмма результатов расчёта ЧДД

Результаты анализа энергетических и экономических показателей различных типов зданий при осуществлении капитального ремонта сведены в таблицу.

Теплотехнические и экономические характеристики многоквартирных домов при реализации энергоэффективных мероприятий

Наименование характеристики	3-этажный кирпичный дом	4-этажный кирпичный дом	5-этажный кирпичный дом	4-этажный панельный дом	5-этажный панельный дом	9-этажный панельный дом
1	2	3	4	5	6	7
Удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период, кВт · ч/(м ³ · год)	225,4	162,3	149,8	116,3	143,9	131,7

1	2	3	4	5	6	7
Расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период, кВт · ч/год	257411	420619	572593	515001	666258	16209645
Общие теплопотери здания за отопительный период, кВт · ч/год	305860	498698	719610	667452	811153	1273085
Класс энергетической эффективности до реализации мероприятий	Е (низкий)	D (пониженный)	D (пониженный)	Е (низкий)	С (пониженный)	D (пониженный)
Удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт · ч/(м ³ · год)	130,2	69,6	82,4	62,5	162,3	93,5
Расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт · ч/год	148677	180505	315037	276717	420454	1150958
Общие теплопотери здания за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт · ч/год	198606	258584	453211	429168	561468	803080
Экономия платы за отопление в 2017 г., тыс.руб.	172,995	232,962	350,370	324,153	453,816	747,779
Экономия платы за отопление в 2017 г., %.	42	57	45	46	58	29
Класс энергетической эффективности после реализации мероприятий	С (нормальный для существующих зданий)	А (повышенный)	«В+» (высокий)	«В+» (высокий)	В+ (высокий)	«В+» (высокий)
Затраты на реализацию, руб.	3183886	3177000	3832907,79	4844645,38	4256128,63	6 293 00

Основные выводы

1. Половина проведенного капитального ремонта фасадов обследованных домов не соответствует требованиям, предъявляемым к капитальному ремонту фасадов, а соответственно, не решает поставленных задач. При планировании ремонтов фасадов на дома, где ремонт проведен с недостаточным качеством или неполностью, закладывали заведомо меньшее количество средств, чем на качественно и полностью отремонтированные фасады.

2. Исходя из расчетов, целесообразно сделать вывод, что утепление приводит к уменьшению потребляемой в здании энергии и, следовательно, к сокращению платежей за отопление.

3. Различные типы МКД нуждаются в повышении энергетической эффективности с помощью улучшения теплозащитной способности ограждающих конструкций и в комплексном их утеплении. При реализации данных мероприятий класс энерге-

тической эффективности зданий, как показывает практика и проведённые расчёты, изменится с пониженного D (требующего реконструкции при дополнительном экономическом обосновании) на повышенный В (высокий). Наибольший экономический эффект от капитального ремонта достигается в зданиях высотой до 4 этажей.

Список литературы

1. Данилов, А.М. Методологические принципы математического моделирования сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – № 1 (1). – С. 76–79.
2. Данилов, А.М. Научная статья с позиций системного анализа / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 183–187.
3. Толстых, Ю.О. Исследование практик организации и деятельности управляющих компаний в современных условиях при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов: монография / Ю.О. Толстых, М.С. Арефьева, Т.В. Учинина. – Пенза, 2014.
4. Сравнение особенностей организации капитального ремонта и реконструкции зданий в России и за рубежом / О.М. Нелюбина, Ю.О. Толстых, С.С. Михалина, Т.В. Учинина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15283>.

References

1. Danilov, A.M. Methodological principles of mathematical modeling of the difficult / A.M. Danilov, I.A. Garkina // PGUAS Bulletin systems: construction, science and education. – 2016. – No. 1 (1). – P.76–79.
2. Danilov, A.M. The scientific article from line items of the system analysis / A.M. Danilov, I.A. Garkina Regional architecture and construction. – 2014. – No. 2. – P.183–187.
3. Tolstykh, Yu.O. A research the practician of the organization and activities of managing companies in modern conditions when carrying out capital repairs of apartment apartment houses: monograph / Yu.O. Tolstykh, M.S. Arefyeva, T.V. Uchinin. – Penza, 2014.
4. Comparison of features of the organization of capital repairs and reconstruction of buildings in Russia and abroad / O. M. Nelyubina, Yu. O. Tolstykh, S. S. Mikhulina, T.V. Uchinina //Modern problems of science and education. – 2014. – No. 5. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15283>.

УДК 691.11-419.3:692.5

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

Вдовин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Karpov5656@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Vdovin Vyacheslav Mikhailovich,
Candidat of Sciences, Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Karpov Vladimir Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: Karpov5656@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЩИТОВ ДЛЯ ПОЛА ТЕАТРАЛЬНОЙ СЦЕНЫ

В.М. Вдовин, В.Н. Карпов

Приводятся результаты испытания клееных элементов деревянных щитов для пола театральной сцены. На основе полученных результатов сделана оценка качества клееной древесины. Проверена надежность щитов.

Ключевые слова: древесина, клееный брус, испытание, качество, надежность

ESTIMATION OF QUALITY AND RELIABILITY OF GLUED WOODEN SHIELDS FOR THE FLOOR OF THEATRE STAGE

V.M. Vdovin, V.N. Karpov

The results of testing glued elements of wooden shields for the floor of a theatre stage are given. The evaluation of the quality of glued wood is based on the obtained results. The reliability of the shields is checked.

Keywords: wood, glued squared beam, test, quality, reliability

В соответствии с рекомендациями, изложенными в "Правилах охраны труда в театрах и концертных залах" Министерства культуры РФ (М., 1998), предъявляются довольно жесткие требования к качеству и эксплуатационной надежности деревянных полов сцены театров и домов культуры. Щиты пола должны обеспечивать прочность при приложении нормативной вертикальной нагрузки 5 кН/м^2 с коэффициентом перегрузки 1,3; щели, выбоины, сколы, выступы и другие дефекты в щитах и между щитами не допускаются.

Ввиду отсутствия цельного бруса из сосновых досок повышенного качества для изготовления щитов планшета сцены предложено использовать клееный брус, что является новым решением; поэтому для оценки эксплуатационной надежности таких щитов возникла необходимость их теоретической и экспериментальной проверки.

Клееный деревянный брус склеивается из двух слоев сосновых профрезированных досок толщиной 25 мм ("в чистоте"). Общая толщина бруса – 50 мм. Для склеивания бруса используются дощатые ленты, собираемые из коротких элементов различной длины и состыкованные между собой путем склеивания на "зубчатый шип", который выходит на пласть.

В основе технологии изготовления клееного бруса лежит получение непрерывной дощатой ленты, не содержащей пороков древесины, путем удаления их при раскросе и

сращивания "чистых" заготовок на "зубчатый шип". При качественном выполнении процессов склеивания в такой дощатой ленте наличие зубчатых стыков должно обеспечивать качество древесины склеенной дощатой ленты по 1-му сорту. Однако это возможно только при налаженной системе операционного контроля всех технологических процессов, строгом соблюдении технологии, что должно быть подтверждено получением комбинатом-изготовителем сертификата на выпускаемую продукцию. Используемый клееный брус двухслойный, склеенная дощатая лента из "чистой" древесины применяется лишь для верхнего слоя клееного пологого бруса. Второй же слой бруса (нижний) получается таким же образом, т.е. склеиванием коротких заготовок на "зубчатый шип", но при этом заготовки являются "отбраковкой" при изготовлении "чистой" дощатой ленты, не содержащей пороков древесины, т.е. в каждой короткой заготовке имеет место тот или иной порок дерева (сучки, косослой, синеватость и т.п.). В связи с этим нижний слой клееного бруса имеет как естественные пороки дерева, так и ослабления вызванные зубчатыми стыками. Длины заготовок для склеивания как 1-го, так и 2-го слоя различные и составляют от 230 до 500 мм. Оба слоя склеены по пласти.

Таким образом, клееный брус имеет клеевые швы в продольном направлении по пласти двух дощатых лент и в поперечных сечениях в виде зубчатых шиповых стыков. При этом поперечные стыки в каждом слое могут располагаться в разных местах каждого слоя, в том числе в одном сечении всего бруса или близко расположенных сечениях.

В соответствии с требованиями [1] основным показателем, характеризующим качество клеевых соединений, является их прочность; поэтому определение предела прочности клеевых соединений является обязательным при оценке качества клееных изделий.

Необходимость проведения натурных контрольных испытаний клееного бруса вызвана также тем, что брус по высоте сечения практически состоит из разных материалов. Верхний слой – из бездефектной древесины, а нижний слой – из древесины низкого качества с большим содержанием пороков. Качество такого комбинированного клееного элемента можно оценить только путем контрольных испытаний.

Для проведения контрольных испытаний были отобраны образцы. Размеры образцов для получения более достоверных результатов были приняты в полном соответствии с натурными размерами брусков, используемых для изготовления клееных деревянных щитов. Сечение брусков 50х83 мм, длина 1250 мм. Конкретные размеры сечения образцов приведены в табл. 1. Ввиду малого их различия размеры даны только для 10 образцов.

Т а б л и ц а 1

Геометрические характеристики образцов

№ п/п	Марка образца	Размеры сечения $b \times h$, мм	Длина, мм	Расчетный пролет, мм	Геометрические характеристики сечения	
					W , см ³	J , см ⁴
1	2	3	4	5	6	7
1	КБ-1	83х50	1250	1150	34,58	86,46
2	КБ-2	83х50	1250	1150	34,58	86,46
3	КБ-3	83х50	1250	1150	34,58	86,46
4	КБ-4	84х50	1250	1150	35,00	87,50
5	КБ-5	83х50	1250	1150	34,58	86,46
6	КБ-6	83х49	1250	1150	33,21	81,37
7	КБ-7	83х50	1250	1150	34,58	86,46
8	КБ-8	83х50	1250	1150	34,58	86,46
9	КБ-9	84х50	1250	1150	35,00	87,50
10	КБ-10	83х50	1250	1150	34,58	86,46

Размеры образцов по высоте полностью соответствовали размеру высоты клееного деревянного щита для пола. Влажность древесины – 12 %.

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 15613.4-78, ГОСТ 21554.2-81, СНиП II-25-80. Нормы проектирования. Деревянные конструкции, СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 и [1].

Испытания проводились на поперечный изгиб по схеме свободнолежащей балки пролетом $\ell = 1150$ мм. Загружение образца производилось одной силой в середине пролета (как более опасный случай для работы клееного бруса). Использовалась гидравлическая машина ГРМ-50.

Загружение образцов осуществлялось по пластевой стороне бруса, т.е. ширине образца $b = 83$ мм. Такое нагружение образца не только полностью соответствовало действительной работе бруса в щите, но и позволяло оценить работу клеевых швов, соединяющих по пласти два слоя досок.

До проведения испытаний образцы подвергались тщательному осмотру и фиксации всех дефектов, включая месторасположение стыковых зубчатых шипов.

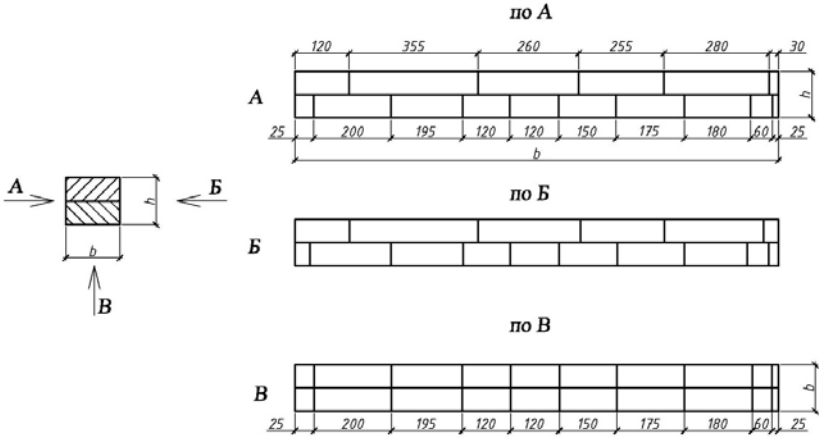
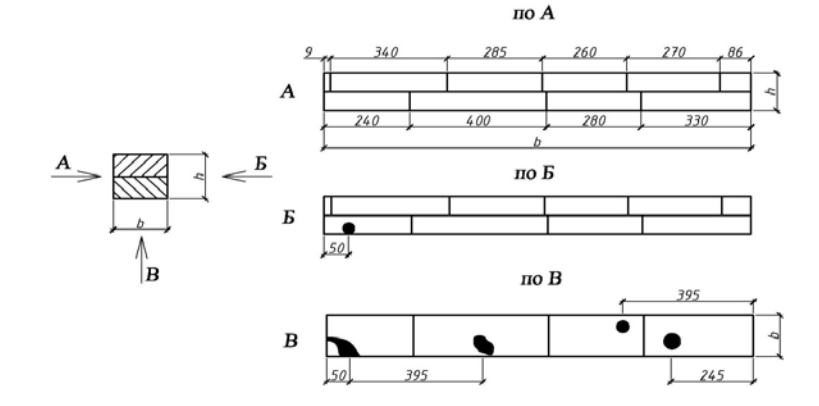
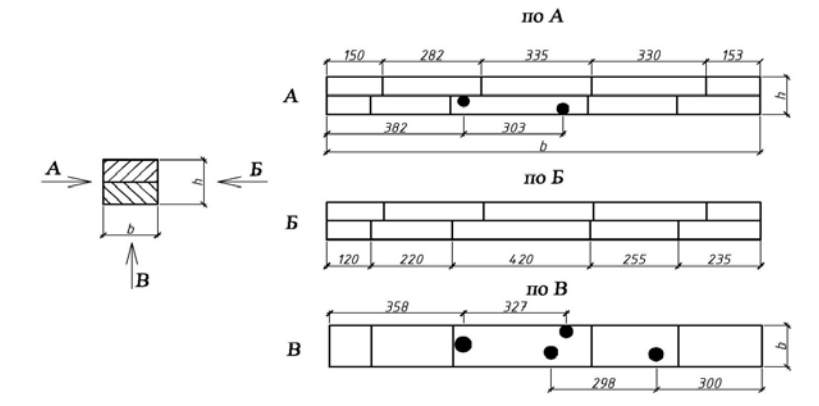
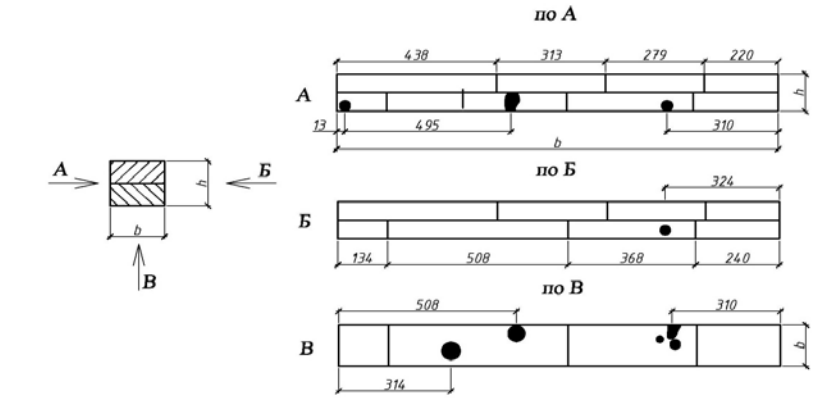
Виды зафиксированных дефектов для некоторых образцов приведены в табл. 2.

Отбор самих образцов производился из общей партии материала произвольно.

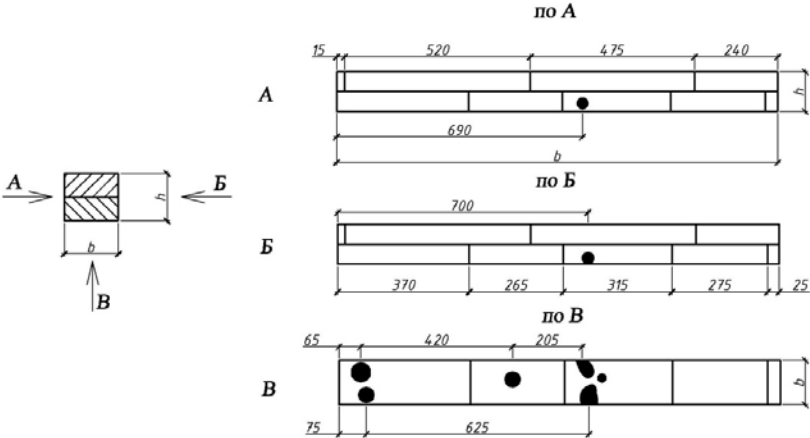
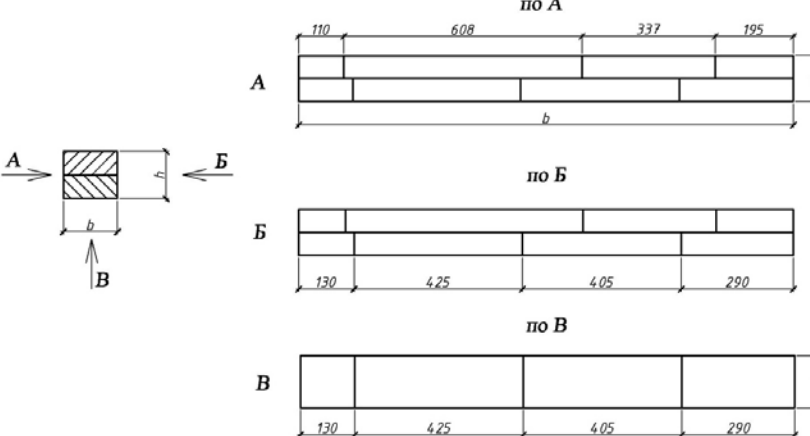
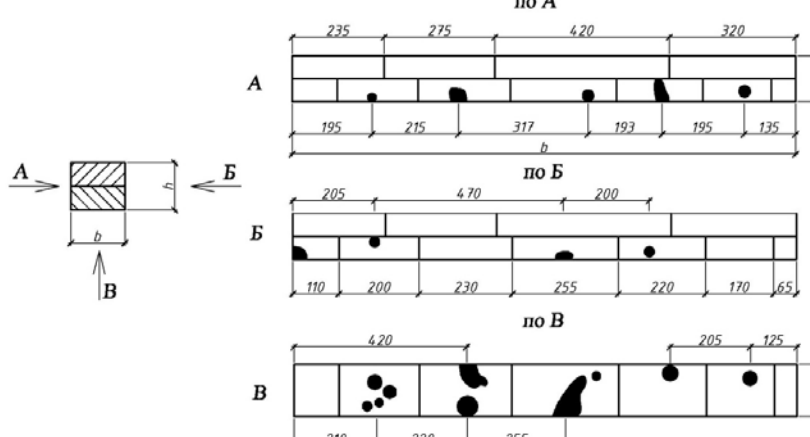
Т а б л и ц а 2

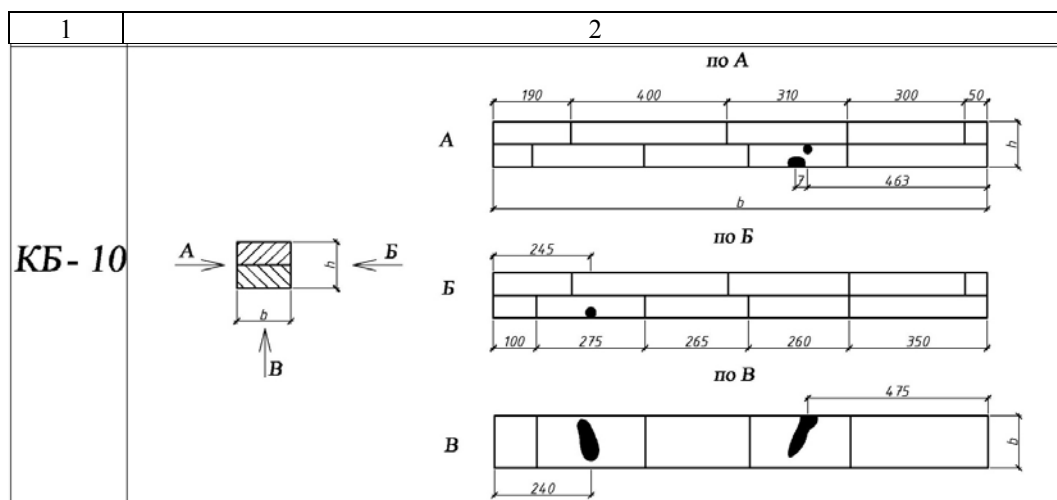
Место расположения стыков и пороков древесины в образцах

Марка образца	Эскиз образца и наличие дефектов и стыков
1	2
КБ - 1	Technical drawing of sample KB-1. It includes a cross-section view showing a rectangular profile with width b and height h. The longitudinal view shows the sample with dimensions: 185, 460, 230, 45, 425, and b. The cross-section view shows a width of 83 mm and a height of 24 mm. The longitudinal view shows a width of 294 mm and a height of 392 mm. The cross-section view shows a width of 185 mm and a height of 30 mm. The longitudinal view shows a width of 370 mm and a height of 55 mm. The cross-section view shows a width of 30 mm and a height of 285 mm.
КБ - 2	Technical drawing of sample KB-2. It includes a cross-section view showing a rectangular profile with width b and height h. The longitudinal view shows the sample with dimensions: 15, 40, 565, 80, 30, 235, 230, 170, 230, 230, 125, and b. The cross-section view shows a width of 140 mm and a height of 50 mm. The longitudinal view shows a width of 195 mm and a height of 190 mm. The cross-section view shows a width of 140 mm and a height of 187 mm. The longitudinal view shows a width of 255 mm and a height of 130 mm. The cross-section view shows a width of 140 mm and a height of 190 mm.

1	2
КБ - 3	
КБ - 4	
КБ - 5	
КБ - 6	

Продолжение табл. 2

1	2
КБ - 7	
КБ - 8	
КБ - 9	



Условные обозначения:

— - стык досок по длине образца;

● - сучки в древесине

Фиксированные дефекты в образцах позволили выполнить оценку их влияния на показатели прочности. Для количественной оценки влияния дефектов на прочность образцов испытания проводились на двух группах образцов:

1. Когда дефектный слой (доска с пороками) располагается в нижней зоне (проектное положение щита), а верхний слой выполнен из "чистой" древесины.

2. Когда дефектный слой (доска с пороками) располагается в верхней зоне, а нижний слой выполнен из доски без пороков древесины.

Следует отметить, что испытания по второму варианту выполнялись исключительно для сравнения и оценки влияния расположения пороков на общую прочность клееного бруса.

Образцы испытывались плавным непрерывным нагружением до разрушения с фиксированием величины разрушающей нагрузки, характера разрушения и величины прогиба.

Фиксирование прогиба при испытаниях осуществлялось с целью получения величины кратковременного модуля упругости древесины при изгибе.

Результаты испытаний некоторых марок образцов (всего 10 шт.) представлены в табл. 3. Для других марок образцов результаты близки к приведенным.

Полученные результаты обработаны методом математической статистики. Для образцов с верхним слоем из чистой древесины получены следующие результаты: $\sigma_{ср}^{пч} = 43$ МПа; среднеквадратичное отклонение $S = 8,75$ МПа; вариационный коэффициент $C_v = 0,203$; показатель точности $p = 14,32$ %.

Для оценки качества клееного бруса подсчитана величина кратковременного нормативного сопротивления с вероятностной надежностью 95 %. Эта величина подсчитана по формуле

$$R^H = \sigma_{пч}^{ср} (1 - 1,64 \cdot C_v) = 43,00(1 - 1,64 \cdot 0,203) = 28,65 \text{ МПа (286,5 кгс/см}^2\text{)}.$$

В соответствии с требованиями [2] испытанная древесина может быть отнесена по качеству ко 2-му сорту $R^H = 28,65$ МПа $> [R^H] = 27$ МПа, где $[R^H] = 27$ МПа – регламентируемое минимальное нормативное сопротивление (эта величина для 1-го сорта равна $[R^H] = 30$ МПа, а для 3-го сорта $[R^H] = 20$ МПа).

Результаты испытания образцов

№ п/п	Марка образца	Разру- шающая нагрузка $P_{\text{разр}}$, кН (кгс)	Максимальные напряже- ния при $P_{\text{разр}}$, МПа		Среднее значение предела прочности, МПа	Характер и причины разрушения
			σ	τ		
1	2	3	4	5	6	7
Образцы 1-й группы с верхним слоем из "чистой" древесины						
1	КБ-2	4,5 (450)	37,39	0,81	43,00	Разрыв нижнего слоя поперек под силой вблизи стыка, продольное расслаивание по шву на длину до 40 см
2	КБ-1	7,2 (720)	59,76	1,30		Разрыв в растянутой зоне по стыку, скалывание вдоль шва на участке от середины до опоры
3	КБ-4	5,8 (580)	48,14	1,04		Поперечный излом по всему сечению по стыкам в обоих элементах
4	КБ-5	5,8 (580)	48,14	1,05		Разрыв в растянутой зоне вблизи сучка
5	КБ-6	3,8 (380)	31,54	0,70		Разрыв по сучку в растянутой зоне, скалывание по шву от силы до опоры
6	КБ-7	4,9 (490)	40,67	0,89		Разрыв поперек по сучку в растянутой зоне, скалывание вдоль шва
7	КБ-9	4,5 (450)	37,35	0,80		Разрыв поперек в нижнем слое по сучку в растянутой зоне, скалывание вдоль шва
8	КБ-10	5,0 (500)	41,50	0,90		Разрыв поперек в нижнем слое по сучку
Образцы 2-й группы с нижним слоем из "чистой" древесины						
9	КБ-8	9,6 (960)	79,86	1,74	69,72	Разрыв поперек и по стыку в сжатом слое
10	КБ-3	7,2 (720)	59,76	1,30		Разрыв по стыку в растянутой зоне, скалывание по шву вдоль образца

В соответствии с требованиями [1] к качеству клееной древесины, средний предел прочности должен находиться в пределах 40–50 МПа. Фактически для испытанных образцов получено значение среднего предела прочности $\sigma_{\text{пч}}^{\text{ср}} = 43,00$ МПа, что позволяет использовать клееную древесину при контроле производства и приемке серийной продукции.

Таким образом, по величине нормативного сопротивления $R^{\text{н}} = 28,65$ МПа качество древесины соответствует 2-му сорту, и все расчетные характеристики при расчете половых щитов можно брать по табличным данным СНиП II-25-80 как для второго сорта древесины сосны.

По результатам испытаний, оценки характера и причин разрушения образцов следует отметить следующее:

1. Причиной разрушения всех образцов являлось наличие пороков древесины и поперечных зубчатых стыков, которые приводят к значительному снижению прочности клееного бруса особенно в случаях, когда находятся со стороны растянутой кромки. Разброс прочности двухслойного клееного бруса, когда дефектная доска находится в сжатой или в растянутой зоне, может составлять почти в три раза (см. образцы КБ-8 с $\sigma_{пч} = 96$ МПа и КБ-6 с $\sigma = 38$ МПа). Поэтому желание (по эстетическим соображениям) иметь верхний слой клееного бруса из чистой древесины, а нижний – из древесины с пороками с точки зрения эксплуатационной надежности не оправданно ввиду резкого снижения предела прочности бруса.

2. Степень снижения предела прочности клееного бруса существенно зависит от величины естественных пороков (сучков), их расположения, наличия и расположения зубчатых стыков. Этим объясняется значительный разброс пределов прочности образцов одной партии – от 31,54 МПа (образец КБ-5) до 59,76 МПа (образец КБ-1).

При изготовлении щитов следует избегать:

- размещения зубчатых стыков в слоях бруса в одном сечении или в сечениях, близких (не менее 150 мм) друг к другу;
- наличия открытых сучков (различной структуры) в нижнем (растянутом) слое, выходящих на кромку доски и пронизывающих более 1/3 ширины бруса;
- размещения зубчатых стыков в одном слое и сучков в другом слое.

Указанных выше дефектов бруса следует избегать при изготовлении клееных деревянных щитов путем удаления подобных участков при раскрое.

Испытаниями установлено, что клееный брус имеет величину кратковременного модуля упругости при изгибе, равную $E_{кр} = (9,1 \div 12) \cdot 10^3$ МПа. Эта величина несколько занижена по сравнению с нормируемой СНиП II-25-80, установленной как $E_{кр} = (1/n_{вр}) \cdot E = (1/0,67) \cdot 10^4 = 1,4 \cdot 10^4$ МПа. Снижение модуля упругости может быть связано как со структурными отклонениями в строении древесины, так и с наличием клееного шва между слоями досок. Однако, учитывая, что полезная нагрузка на пол сцены носит кратковременный характер, для оценки жесткости (деформативности) клееных щитов можно принять величину $E = 0,9 \cdot 10^4$ МПа, считая ее как кратковременную.

Установив путем проведенных испытаний качество клееной древесины брусков клееного планшета для пола сцены и учитывая требования к их эксплуатационной надежности (щиты по прочности и жесткости должны выдерживать нормативную нагрузку $p^H = 5$ кН/м² с коэффициентом надежности $\gamma_f = 1,3$), выполнили конструктивные расчеты согласно [2, 3], которые показали, что $\sigma = 2,69$ МПа < $R_n = 13$ МПа. Следовательно, прочность щита обеспечена, и $f_{max}/\ell = 1/900 < [1/200]$, значит, жесткость щитов достаточна.

Из проведенных лабораторных испытаний и выполненных конструктивных расчетов по использованию клееного двухслойного бруса в конструкциях полов следует:

1. По качеству клееной древесины двухслойный брус с расположением бездефектного "чистого" слоя вверху и с наличием дефектов внизу, используемый для щита пола сцены, может быть отнесен ко 2-му сорту согласно [2, 3].

2. Снижение качества древесины клееного бруса происходит из-за наличия в нижнем слое бруса значительных пороков (преимущественно сучков), а также поперечных зубчатых стыков дощатых элементов. Особую опасность при этом представляют открытые сучки, выходящие на кромку доски и охватывающие более 1/3 ее ширины. При этом наличие зубчатых стыков также приводит к преждевременному разрушению, если они располагаются в непосредственной близости (менее 100 мм) друг от друга или от сучка.

3. Конструктивные расчеты щитов, выполненные согласно требованиям [2, 3], с учетом оценки качества древесины брусков согласно п.1, показали, что прочность и

жесткость щитов пола из бруса сечением 50x83 мм при расчетном пролете $\ell = 1150$ мм достаточны для восприятия полезной нормативной нагрузки $p^n = 5$ кН/м² (500 кгс/м²) с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,3$. Щиты из клееного бруса могут быть использованы для изготовления планшета сценической части Дома культуры (г. Заречный, Пензенская область).

Список литературы

1. Рекомендации по контролю качества клеевых соединений деревянных клееных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1981. – 63 с.
2. СНиП II-25-80. Нормы проектирования. Деревянные конструкции. – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.
3. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М., 2011.

References

1. Recommendations on quality control of glued joints glued wooden constructions / CNIISK them. Kucherenko. – M.: Stroiizdat, 1981. – 63 p.
2. SNiP II-25-80. Design standards. A wooden structure. – M.: Stroyizdat, 1982. – 66 p.
3. SP 64.13330.2011. Wooden structures. The updated edition of SNiP II-25-80. – M., 2011.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628. 543.3/9

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (841-2) 563511; факс: (841-2) 565122

Перелыгин Юрий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Химия»
E-mail: pyp@pnzgu.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

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

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

Шейн Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
тел.: (841-2) 563511; факс: (841-2) 565122

Perelygin Yuri Petrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Chemistry»
E-mail: pyp@pnzgu.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

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ю.П. Перелыгин, М.В. Бикунова, Н.Н. Ласьков, А.И. Шейн

Приведены уравнения для определения оптимальных значений pH, обеспечивающих концентрацию ионов тяжелых металлов в сточных водах предприятий равной или меньшей ПДК. Полученные зависимости могут быть использованы технологами очистных сооружений для определения оптимальных режимов удаления тяжелых металлов из сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды предприятий, очистные сооружения, тяжелые металлы, осаждение, водородный показатель

CALCULATION OF THE HYDROGEN INDEX OPTIMAL VALUES IN THE PRECIPITATION OF HEAVY METAL IONS IN INDUSTRIAL WASTE WATER

Yu. P. Pereygin, M. V. Bikunova, N. N. Laskov, A.I. Shein

Equations for the determination of optimal pH values providing of heavy metal ions concentration in the industrial wastewater of equal and lower MPC are given. The obtained dependences can be used by technologists of treatment facilities to increase the efficiency of heavy metals removal from wastewater.

Keywords: industrial wastewater, treatment plants, heavy metals, precipitation, hydrogen index

Введение

На машиностроительных и приборостроительных предприятиях имеются цехи или участки по нанесению гальванических покрытий и изготовлению печатных плат, работа которых связана со значительным потреблением воды из городского водопровода для промывки деталей и ее последующим сбросом в городскую канализационную систему.

Сточная вода таких предприятий содержит одновременно значительные количества ионов тяжелых и цветных металлов – цинка, алюминия, меди, никеля, хрома, железа, кадмия и некоторых других, а также ионов аммония, сульфата, хлора, нитратов, ПАВ и органических веществ, которые могут образовывать комплексные соединения с указанными ионами металлов.

Перед сбросом в городскую систему водоотведения сточная вода подвергается реагентной очистке от ионов тяжелых металлов на локальных очистных сооружениях предприятия до предельно допустимых концентраций (ПДК) путем перевода их в малорастворимые гидроксиды $M(OH)_z$ [1, 2].

Ранее в работах [3-10] для растворов, содержащих только один вид ионов металлов, были установлены оптимальные значения водородного показателя, при которых концентрации ионов становятся меньше или равными ПДК. В реальных условиях в сточных водах предприятий приборо- и машиностроения содержатся одновременно все перечисленные выше ионы.

Таким образом, определение величины pH, при которой концентрации всех или почти всех присутствующих ионов металлов в сточной воде меньше или равны ПДК, представляет собой достаточно актуальную задачу как с практической, так и с научной стороны.

Результаты и обсуждение

Необходимо отметить, что в сточных водах достаточно часто содержатся аммиак и органические или неорганические анионы, способные образовывать комплексные соединения с ионами металлов, в том числе и гидроксокомплексы $Na_{y-z}[M(OH)_y]$ (где y – координационное число, z – валентность металла), препятствующие образованию малорастворимых гидроксидов металлов [6-10]. В этом случае для более полного осаждения ионов металлов необходимо предварительно удалить лиганд. Например, для удаления аммиака можно использовать технологический процесс, представленный в [11].

Высококонцентрированные растворы целесообразно предварительно, перед сбросом на очистные сооружения предприятия, подвергать утилизации непосредственно в гальваническом цехе с извлечением гидроксидов металлов для последующей их переработки на специализированных предприятиях [12].

Если в сточной воде содержатся ионы металлов, например кадмий, медь, свинец, железо и никель, которые не образуют гидроксокомплексы, то pH, при котором концентрация ионов указанных металлов меньше или равна ПДК, можно рассчитать по уравнению, которое получено простым преобразованием уравнения $Pr=[M^{+z}][OH]^{-z}$, приведенного А.П. Крешковым:

$$pH = 14 + \frac{1}{z} \lg A + \frac{1}{z} \lg Pr - \frac{1}{z} \lg ПДК, \quad (1)$$

где Пр – произведение растворимости гидроксида металла; z – валентность металла; A – атомная масса металла; ПДК – предельно допустимая концентрация иона металла в сточной воде предприятия (г/л).

Решением уравнения (1) является минимальное значение pH, при котором концентрации, например, иона меди или кадмия меньше или равны их ПДК в сточной воде. Так, для ионов меди при ПДК, равной 0,02 мг/л, а для ионов кадмия при ПДК, равной 0,01 мг/л, значения pH соответственно равны 8,6 и 10,2.

В случае, если в сточной воде содержатся ионы, способные образовывать гидроксокомплексы $\text{Na}_{y-z}[\text{M}(\text{OH})_y]$, то расчет оптимального значения pH, при котором концентрация иона металла и его гидроксокомплекса (г/л) над осадком гидроксида, например, цинка, хрома или алюминия меньше или равна ПДК, можно произвести по уравнению [6-8]:

$$\text{ПДК} = \frac{A\text{Пр}(K_w)^{y-x}}{10^{-\text{pH}(y-x)} K} + \frac{A\text{Пр}10^{-\text{pH}x}}{(K_w)^x}, \quad (2)$$

где K – константа нестойкости комплексного соединения; K_w – ионное произведение воды.

В уравнении (2) первое слагаемое позволяет рассчитать концентрацию иона металла, а второе слагаемое – концентрацию его гидроксокомплекса в зависимости от pH раствора. Решением данного уравнения является интервал значений pH для цинка 9,15-10,3 (ПДК цинка равна 0,01 мг/л), т.е. осаждение цинка до ПДК происходит в очень узком интервале pH. Осаждение хрома до ПДК (ПДК хрома (III) равна 0,03 мг/л) происходит в более широком интервале pH 6-9,5. Данные значения интервалов pH практически точно совпадают с величинами, приведенными Ю.Ю. Лурье и в [1, 13, 14]. При совместном присутствии данных ионов интервал pH, при котором концентрация ионов данных металлов не превышает установленных для них значений ПДК, становится еще более узким и равен 9,15-9,5.

Как показывает расчет по уравнению (2), алюминий в растворе находится в виде малорастворимого гидроксида в интервале pH от 5 до 10, что практически совпадает с рекомендуемыми значениями pH в [15].

Случай, когда в растворе возможно образование комплексного соединения $[\text{M}(\text{L})_y^{(-yn+z)}]$ и определение оптимального значения pH, при котором его концентрация меньше или равна ПДК, рассмотрен в [9, 10].

Выводы

1. Приведенные выше уравнения позволяют определить интервал значений pH, при котором концентрации ионов тяжелых металлов, находящихся в виде ионов, гидроксокомплексов и комплексов в сточной воде предприятия, меньше или равны ПДК.
2. Поддержание данных значений pH на локальных очистных сооружениях позволит снизить плату промышленного предприятия за сброс сточных вод в городской коллектор.

Список литературы

1. Проскуряков, В.А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В.А. Проскуряков, Л.И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
2. Волоцков, Ф.П. Очистка и использование сточных вод гальванических производств / Ф.П. Волоцков. – М.: Химия, 1983. – 104 с.
3. Расчет оптимального значения pH осаждения ионов тяжелых металлов в виде гидроксидов при очистке сточных вод / Ю.П. Перелыгин, И.В. Рашевская, О.В. Зорькина, А.А. Флягин // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Совершенствование работы систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий». – Пенза: ПГУАС, 2011. – С. 256–260.

4. Перельгин, Ю.П. О термине «рН начала осаждения гидроксидов тяжелых металлов» / Ю.П. Перельгин, И.В. Рашевская // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т.79, №3. – С. 501–502.
5. Перельгин, Ю.П. рН осаждения гидроксидов тяжелых металлов / Ю.П. Перельгин // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции (31 октября 2013 г.). – Тамбов: ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – Ч. 4. – С.110–113.
6. Перельгин, Ю.П. Расчет относительной доли иона металла, перешедшего в гидроксокомплекс, в зависимости от рН раствора / Ю.П. Перельгин // Журнал прикладной химии. – 2011. – Т.84, №6. – С. 1053–1054.
7. Перельгин, Ю.П. Расчет относительной доли иона алюминия, перешедшего в нерастворимый гидроксид, в зависимости от рН воды / Ю.П. Перельгин // Водоочистка. – 2014. – №7. – С. 29–31.
8. Перельгин, Ю.П. Расчет оптимального значения рН осаждения ионов цинка и хрома(III) из сточных вод и отработанных растворов / Ю.П. Перельгин // Водоочистка. – 2015. – №2. – С. 20–23.
9. Перельгин, Ю.П. К вопросу о равновесии между осадком гидроксида металла и раствором, содержащим лиганд / Ю.П. Перельгин, Т.В. Зуева, О.В. Зорькина // Альманах современной науки и образования. – Тамбов: Грамота, 2012. – № 12 (67), Ч. II. – С. 121–123.
10. Перельгин, Ю.П. К вопросу о растворимости осадка в избытке осадителя – лиганда / Ю.П. Перельгин, Jaskula Marian // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – №1. – С.111–114.
11. Технология утилизации концентрированных растворов, содержащих ионы цинка, кадмия или меди и аммония / Ю.П. Перельгин, А.А. Флягин, Т.В. Зуева, О.В. Зорькина // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – №1. – С.87–91.
12. Новый подход к очистке сточных вод и отработанных электролитов гальванических производств / Ю.П. Перельгин [и др.] // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2010. – №2. – С.54–57.
13. Снижение экологической опасности металлосодержащих сточных вод / С.В. Пестриков, Н.Н. Красногорская, Г.Н. Сапожникова, О.Ю. Исаева. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2006. – 252 с.
14. Таланов, В.М. Ионные равновесия в водных растворах / В.М. Таланов, Г.М. Житный. – М.: Академия Естествознания, 2007. – URL: <http://www.rae.ru/monographs/>.
15. Справочник по очистке природных и сточных вод / Л.Л. Пааль, Я.Я. Кару, Х.А. Мендер, Б.Н. Репин. – М.: Высш. шк., 1994. – С. 51–58.

References

1. Proskuryakov, V.A. Wastewater treatment in the chemical industry / V.A. Proskuryakov, L.I. Schmidt. – L. «Chemistry», 1977. – 464 p.
2. Volotkov, F.P. Cleaning and use of effluents from galvanic plants / F.P. Volotkov. – M.: Chemistry, 1983. – 104 p.
3. Calculation of the Optimal pH of Precipitation of Heavy Metal Ions in the Form of Hydroxides in the Purification of Waste Water / Yu.P. Perelygin, I.V. Rashevskaya, O.V. Zorkina, A.A. Flyagin // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Improving the operation of water supply and sanitation systems in settlements and industrial enterprises». – Penza: PSUAC, 2011. – P. 256–260.
4. Perelygin, Yu.P. About the term «pH start of heavy metal hydroxides precipitation» / Yu.P. Perelygin, I.V. Rashevskaya // Journal of Applied Chemistry. – 2006. – Т.79. – №3. – С. 501–502.
5. Perelygin, Yu.P. pH of heavy metal hydroxides precipitation / Yu.P. Perelygin // Current trends in education and science. Collection of scientific papers on the materials of the scientific and practical conference (October 31, 2013). – Tambov: TPOO «Business-Science-Society», 2013. – Part 4. – P.110–113.

6. Perelygin, Yu.P. Calculation of the relative proportion of the metal ion that passed into the hydroxo complex, depending on the pH of the solution / Yu.P. Perelygin // *Journal of Applied Chemistry*. – 2011. – T.84, № 6. – P. 1053–1054.
7. Perelygin, Yu.P. Calculation of the relative fraction of an aluminum ion converted into insoluble hydroxide, depending on the pH of water / Yu.P. Perelygin // *Water purification*. – 2014. – No. 7. – P. 29–31.
8. Perelygin, Yu.P. Calculation of the optimum pH value of zinc and chromium(III) ions precipitation from wastewater and waste solutions / Yu.P. Perelygin // *Water purification*. – 2015. – №2. – P. 20–23.
9. Perelygin, Yu.P. To the question of the equilibrium between the precipitate of metal hydroxide and the solution containing the ligand / Yu.P. Perelygin, T.V. Zueva, O.V. Zorkina // *Almanac of Modern Science and Education*. – Tambov: Diploma, 2012. – № 12 (67), Part II. – P. 121–123.
10. Perelygin, Yu.P. On the solubility of a precipitate in excess of a precipitant-ligand / Yu.P. Perelygin, Marian Jaskula // *Bulletin of the Penza State University*. – 2013. – No. 1. – P.111–114.
11. Technology of utilization of concentrated solutions containing zinc, cadmium or copper and ammonium ions / Yu.P. Perelygin, A.A. Flyagin, T.V. Zueva, O.V. Zorkina // *Regional architecture and construction*. – 2009. – №1. – P.87–91.
12. A new approach to wastewater treatment and spent electrolytes of galvanic industries / Yu.P. Perelygin [etc.] // *Water purification, water treatment, water supply*. – 2010. – №2. – P.54–57.
13. Reducing the environmental hazard of metal-containing wastewater / S.V. Pestrikov, N.N. Krasnogorskaya, G.N. Sapozhnikova, O.Yu. Isaeva. – Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2006. – 252 p.
14. Talanov, V.M. Ionic equilibrium in aqueous solutions / V.M. Talanov, G.M. Zhitny. – M.: Publishing house «Academy of Natural History», 2007. – URL: <http://www.rae.ru/monographs/>.
15. Handbook on the purification of natural and waste water / L.L. Paal, Ya.Ya. Karu, Kh.A. Mender, B.N. Repin. – M.: Higher education. Sc., 1994. – P. 51–58.

УДК 696.2

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Осипова Наталия Николаевна,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
гидрогазодинамика»
E-mail: osnat75@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Ежов Евгений Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы»

Грейсху Григорий Исаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Физика и химия»
E-mail: grey@pguas.ru

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

*Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov*

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

Osipova Natalya Nikolaevna,
Doctor of Science, Assistant Professor,
Head of Department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydroaerodynamics»
E-mail: osnat75@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Ezhov Evgeniy Grigorievich,
Doctor of Physics and Mathematics Sciences,
Professor, of the department «Information and
computing systems»

Greysoukh Grigoriy Isaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Physics and Chemistry»
E-mail: grey@pguas.ru

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

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ УГЛЕВОДОРОДНЫМ ГАЗОМ

Н.Н. Осипова, Б.М. Гришин, Е.Г. Ежов, Г.И. Грейсху, О.В. Тараканов

Приводятся результаты исследований по оптимизации параметров региональных газораспределительных систем снабжения сжиженным углеводородным газом на базе газонаполнительных станций. С учетом способов доставки сжиженного газа потребителям (автоцистерны и баллоновозы), технических характеристик транспортных средств и особенностей дорожной инфраструктуры, плотности газопотребления на газоснабжаемой территории, технических характеристик и схемных решений поселковых систем газоснабжения, направления использования сжиженного газа была обоснована целесообразность формирования региональной газораспределительной системы на базе крупных газонаполнительных станций областного масштаба с радиусом действия до 180 км и мощностью реализации до 160 тыс. тонн в год.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, газонаполнительные станции, распределительная сеть, радиус действия, мощность газонаполнительной станции

FORMATION OF OPTIMUM STRUCTURE OF A REGIONAL GAS DISTRIBUTION SYSTEM FOR SUPPLY OF CONSUMERS WITH LIQUEFIED HYDROCARBON GAS

N. N. Osipova, B. M. Grishin, E.G. Ezhov, G.I. Greysoukh, O.V.Tarakanov

This paper describes the results of studies on optimizing regional gas distribution systems designed for supply of liquefied hydrocarbon gas (LHG) based on gas filling stations (GFS). With due allowance for methods of LHG delivery to consumers (tank trucks and cylinder carriers), specifications of carriers and features of road infrastructure, density of gas consumption in the territory of gas delivery, community gas supply systems performance and configuration patterns and LHG use directions, feasibility of the formation of regional gas distribution systems based on large gas filling stations of regional scale with work range of up to 180 km and output (capacity) of up to 160 kilo tons per year was justified.

Keywords: liquefied hydrocarbon gas, gas filling stations, distribution network, work range, gas filling station output

ВВЕДЕНИЕ

Опорным пунктом систем газоснабжения регионального уровня являются газонаполнительные станции (ГНС). Они осуществляют прием сжиженного углеводородного газа (СУГ), поступающего с газонефтеперерабатывающих заводов, его хранение, розлив в транспортные емкости и последующую доставку потребителям. В настоящее время в газовых хозяйствах Российской Федерации находится в эксплуатации более 300 газонаполнительных станций [1, 2]. Как правило, ГНС строятся по типовым проектам с годовой производительностью 3, 12, 20 и 40 тыс. т/год с радиусом действия до 100 км [3, 4].

Доставка СУГ с ГНС к потребителям осуществляется автомобильным транспортом (в автоцистернах и баллоновозах). Автомобильные цистерны используются для перевозки больших объемов газа и служат для доставки газа крупным потребителям с последующим сливом в групповые резервуарные установки. Небольшие объемы газа доставляются потребителям непосредственно с ГНС в баллонах. Доставка СУГ потребителям в баллонах непосредственно с ГНС обуславливает высокий уровень транспортных затрат, что увеличивает конечную стоимость СУГ для потребителя.

В то же время ГНС требует отчуждения значительных по площади земельных участков (несколько гектаров). Использование данных участков требует прокладки коммуникаций инженерной инфраструктуры (электроэнергия, вода, тепло, канализация и т.д.), выполнения большого объема земляных и строительных работ (возведение производственных и вспомогательных зданий и сооружений), а также сооружения железнодорожной ветки и примыкания автодорог станции к автомобильным дорогам населенного пункта. Указанные обстоятельства обуславливают высокую стоимость строительно-монтажных работ, большой объем капиталовложений в сооружение станции и расходов по ее эксплуатации, что также сказывается на повышении себестоимости газа при его реализации.

Эффективная организация снабжения населения сжиженным газом по комплексу «ГНС – потребитель» зависит от многочисленных факторов, а именно: технологических параметров газонаполнительных станций, способов доставки сжиженного газа потребителям (автоцистерны и баллоновозы), технических характеристик транспортных средств и особенностей дорожной инфраструктуры, технических характеристик и схемных решений поселковых систем газоснабжения (снабжение потребителей осуществляется через резервуарные или баллонные установки), направлений использования сжиженного газа (пищеприготовление, горячее водоснабжение, отопление, промышленная нагрузка) и др.

Проведенный литературный анализ показывает, что, несмотря на положительные решения ряда научно-технических задач в трудах разных авторов [5-7], проблема оптимального функционирования и развития региональных систем снабжения сжиженным газом требует дополнительной системной проработки. При этом на совре-

менном этапе развития газораспределительной отрасли особую актуальность приобретают вопросы оптимальной централизации региональных систем снабжения сжиженным газом и совершенствования структуры его реализации потребителям.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время для выполнения технико-экономических расчетов систем газоснабжения широко используются методические рекомендации [8]. Однако, как показывает проведенный анализ, удельные показатели для расчета и проектирования систем снабжения СУГ, рекомендованные к использованию, не соответствуют в должной мере современным требованиям газораспределительной отрасли и нуждаются в существенной корректировке.

Современное развитие экономики в большой степени зависит от динамики стоимости энергоресурсов. В этой связи исчисление эксплуатационных затрат по транспортировке СУГ в баллонах и автоцистернах проводилось с учетом современной динамики цен на энергоресурсы в соответствии с рекомендациями [9]. Энергетическая составляющая затрат (стоимость моторного топлива) принималась с учетом индексации [10]. Затраты по элементам распределительных систем газоснабжения представлены в таблице.

Удельные экономические показатели по элементам систем снабжения сжиженным газом (на 1 т продукта)

Элемент системы газоснабжения	Капвложения К, руб./т	Эксплуатационные расходы И, руб./год·т	Затраты З, руб./год·т
1	2	3	4
1. Железнодорожный транспорт при доставке СУГ с НПЗ на ГНС	2350	$21,98 \cdot l^{0,68}$	$235 + 21,98 \cdot l^{0,68}$
ГНС при реализации газа: – в автомобильных цистернах	$\frac{349 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{62,9 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{978 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$
– в баллонах	$\frac{652 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{117,8 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{183 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$
2. Газонаполнительный пункт	$\frac{5,64 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{1,55 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$	$\frac{2,11 \cdot 10^5}{N^{0,8}}$
3. Автомобильный транспорт для доставки СУГ потребителям по: <i>дорогам с низшим покрытием (грунт)</i>			
– автомобильными цистернами	$1059 + 66,5 \cdot l$	$258 + 23,6 \cdot l$	$364 + 30,3 \cdot l$
– баллоновозами	$3418 + 131,4 \cdot l$	$2717 + 141 \cdot l$	$3059 + 154 \cdot l$
<i>по дорогам с переходным покрытием (щебень)</i>			
– автомобильными цистернами	$1059 + 26,7 \cdot l$	$258 + 13,8 \cdot l$	$364 + 16,5 \cdot l$
– баллоновозами	$3418 + 55,2 \cdot l$	$2717 + 80,7 \cdot l$	$3059 + 86,2 \cdot l$
<i>по дорогам с усовершенствованным покрытием (асфальтобетон)</i>			
– автомобильными цистернами	$1059 + 13,2 \cdot l$	$258 + 10,7 \cdot l$	$364 + 12 \cdot l$
– баллоновозами	$3418 + 25,9 \cdot l$	$2717 + 55,7 \cdot l$	$3059 + 58,3 \cdot l$
4. Индивидуальные резервуары, распределительные газопроводы, включая домовые вводы	231336	9739	32873

1	2	3	4
5. Групповые резервуарные установки, распределительные газопроводы, включая домовые вводы: – одноэтажная застройка населенного пункта с разбросанной планировкой	75700	7580	15150
– одноэтажная застройка населенного пункта с компактной планировкой	56300	5650	11280
6. Внутриквартирные газобаллонные установки	19600	3200	5160

В общем случае для смешанной схемы газоснабжения (через баллонные и резервуарные установки) целевая функция задачи имеет следующий вид:

$$Z_{\text{ГНС-П}} = Z_{\text{ГНС}}^p + Z_{\text{ат}}^p + Z_{\text{ру}} + Z_{\text{рг}} + Z_{\text{вг}} + Z_{\text{ГНС}}^b + Z_{\text{ат}}^b + Z_{\text{бу}} = \min, \quad (1)$$

где $Z_{\text{ГНС}}^p, Z_{\text{ГНС}}^b$ – затраты по ГНС при реализации газа потребителю через резервуарные и баллонные установки, руб./т; $Z_{\text{ат}}^p, Z_{\text{ат}}^b$ – затраты в транспортировку газа автотранспортом при его реализации через резервуарные и баллонные установки, руб./т; $Z_{\text{ру}}, Z_{\text{бу}}$ – затраты в резервуары и в баллоны, устанавливаемые у потребителя, руб./т; $Z_{\text{рг}}, Z_{\text{вг}}$ – затраты в распределительные и внутридомовые газопроводы, руб./т.

Так как затраты в бытовые газовые приборы потребителя (газовые плиты, водонагреватели, газовые отопительные котлы) не зависят от технических характеристик региональных систем снабжения СУГ, при проработке целевой функции данные затраты не учитываются в общей структуре затрат.

Элементы затрат по ГНС при реализации через баллонные и резервуарные установки описываются в виде функциональных зависимостей

$$Z_{\text{ГНС}}^p = f(N_p); \quad (2)$$

$$Z_{\text{ГНС}}^b = f(N_b), \quad (3)$$

где N_p, N_b – годовая пропускная способность (мощность) ГНС при реализации газа через резервуарные и баллонные установки, т/год.

Затраты в транспортировку газа автотранспортом при его реализации через резервуарные и баллонные установки, руб./т, описываются в виде функционалов

$$Z_{\text{ат}}^p = f(a_p, b_p, l_p); \quad (4)$$

$$Z_{\text{ат}}^b = f(a_b, b_b, l_b), \quad (5)$$

где a_p, a_b, b_p, b_b – стоимостные параметры, принимаемые в зависимости от способа реализации СУГ, вида дорожного покрытия и автотранспорта (автоцистерны или баллоновозы) по вышеприведенной таблице; l_p, l_b – дальность доставки СУГ по автомобильным дорогам от ГНС до потребителя при реализации через резервуарные установки автоцистернами и баллонные установки баллоновозами, км.

Функционалы (4) и (5) реализуются при следующих ограничениях к управляющему параметру – дальности доставки l : $l^{\min} \leq l_{p,b} \leq l^{\max}$. Дальность доставки $l_{p,b}$ СУГ принимается в соответствии со следующими соображениями. Доставка СУГ с ГНС до населенного пункта осуществляется автотранспортом по автомобильным

дорогам, конфигурация которых имеет бесконечно большое разнообразие. В то же время минимальное расстояние $l_{\min}$ и максимальное расстояние $l_{\max}$ формируют два полярных варианта доставки СУГ:

$l_{\min}$ – самый короткий путь от ГНС до населенного пункта (радиальная дорожная сеть). В этом случае связь между дальностью транспортирования продукта по автодорогам l и радиусом его доставки R устанавливает соотношение $l_{\min} = R$;

$l_{\max}$ – самый длинный путь от ГНС до населенного пункта (прямоугольная дорожная сеть). В этом случае имеем $l_{\max} = \sqrt{2}R$.

Примем для решения задачи средний вариант доставки продукта, т.е.

$$l_{\text{cp}} \cong 1,2R. \quad (6)$$

При средней дальности транспортирования СУГ $l_p = l_{\text{cp}}^p$ и $l_6 = l_{\text{cp}}^6$ затраты в региональную систему газоснабжения (выражение (1)) с учетом (2)-(5) и таблицы примут вид

$$\begin{aligned} Z_{\text{ГНС-П}} &= \frac{A_p}{N_p^{0,8}} + a_p + b_p l_{\text{cp}}^p + Z_{\text{py}} + Z_{\text{pr}} + Z_{\text{вр}} + \frac{A_6}{N_6^{0,8}} + a_6 + b_6 l_{\text{cp}}^6 + Z_{\text{бу}} = \\ &= \frac{A_p}{N_p^{0,8}} + b_p l_{\text{cp}}^p + M_p + \frac{A_6}{N_6^{0,8}} + b_6 l_{\text{cp}}^6 + M_6, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$M_p = a_p + Z_{\text{py}} + Z_{\text{pr}} + Z_{\text{вр}}; \quad M_6 = a_6 + Z_{\text{бу}}. \quad (8)$$

Полагая, что потребители газа распределены на территории газоснабжения равномерно, с плотностью газопотребления q , т/(год·км²), запишем следующее выражение, связывающее мощность ГНС и радиус ее действия:

$$N_{\text{ГНС}} = N_6 + N_p = q\pi R_{\text{ГНС}}^2, \quad (9)$$

где $R_{\text{ГНС}}$ – радиус действия ГНС, км; q – плотность газопотребления на территории действия ГНС, т/(год·км²).

Обозначим через коэффициент β долю газа, реализуемую через резервуарные установки потребителя. Значение коэффициента β принимается в диапазоне от 0 до 1. Значение коэффициента $\beta=0$ соответствует реализации СУГ только через баллонные установки. При $\beta=1$ реализация газа осуществляется только через резервуарные установки СУГ.

В этом случае годовая реализация газа с ГНС, т/год, через резервуарные установки составит:

$$N_p = q\beta\pi R_{\text{ГНС}}^2. \quad (10)$$

В то же время годовая реализация газа с ГНС через баллонные установки, т/год, составит:

$$N_6 = q(1-\beta)\pi R_{\text{ГНС}}^2. \quad (11)$$

Выражение для целевой функции задачи с учетом выражений (10) и (11) имеет вид

$$Z_{\text{ГНС-П}} = \frac{A_p \beta^{0,2}}{\pi^{0,8} q^{0,8} R_{\text{ГНС}}^{1,6}} + (b_p l_{\text{cp}}^p + M_p) \beta + \frac{A_6 (1-\beta)^{0,2}}{\pi^{0,8} q^{0,8} R_{\text{ГНС}}^{1,6}} + (b_6 l_{\text{cp}}^6 + M_6) (1-\beta). \quad (12)$$

Мощность ГНС определяет количество реализуемого и потребляемого населением газа на газоснабжаемой территории, т.е. $N_{\text{ГНС}} = Q$.

Общее количество СУГ, потребляемое населением через баллонные и резервуарные установки, в соответствии с выражением (9) составляет, т/год:

$$Q = q\pi R_{\text{ГНС}}^2 = qF, \quad (13)$$

где F – площадь территории, снабжаемой СУГ от ГНС, км².

С увеличением радиуса действия ГНС возрастают удельные приведенные затраты в доставку 1 тонны СУГ до удаленного населенного пункта. В то же время увеличивается количество реализуемого, а следовательно, и потребляемого газа. Прирост потребления СУГ через баллонные и резервуарные установки, соответствующий приращению радиуса газоснабжаемой территории, формирует выражение целевой функции

$$Z_{\text{ГНС-П}} = \frac{A_p \beta^{0.2}}{\pi^{0.8} q^{0.8} R_{\text{ГНС}}^{1.6}} + (0,8b_p R_{\text{ГНС}} + M_p) \beta + \frac{A_6 (1-\beta)^{0.2}}{\pi^{0.8} q^{0.8} R_{\text{ГНС}}^{1.6}} + (0,8b_6 R_{\text{ГНС}} + M_6) (1-\beta). \quad (14)$$

При баллонном газоснабжении потребителей ($\beta=0$) выражение (14) примет вид

$$Z_{\text{ГНС-П}} = \frac{A_6}{q^{0.8} \pi^{0.8} R_{\text{ГНС}}^{1.6}} + 0,8b_6 R_{\text{ГНС}} + M_6. \quad (15)$$

Аналогично, при резервуарном газоснабжении потребителей ($\beta=1$) выражение (14) примет вид

$$Z_{\text{ГНС-П}} = \frac{A_p}{\pi^{0.8} q^{0.8} R_{\text{ГНС}}^{1.6}} + 0,8b_p R_{\text{ГНС}} + M_p. \quad (16)$$

Значение оптимального радиуса действия газонаполнительной станции $R_{\text{ГНС}}^{\text{opt}}$ определяется при дифференцировании выражений (14)-(16) по управляющему параметру $R_{\text{ГНС}}$.

В результате имеем:

– при смешанной схеме газоснабжения потребителей СУГ (использование резервуаров и баллонов у потребителя при $0 < \beta < 1$)

$$R_{\text{ГНС}}^{\text{opt}} = \left[\frac{2(A_p \beta^{0.2} + A_6 (1-\beta)^{0.2})}{\pi^{0.8} q^{0.8} (b_p \beta + b_6 (1-\beta))} \right]^{0.385}; \quad (17)$$

– при газоснабжении потребителей через баллонные установки ($\beta=0$)

$$R_{\text{ГНС}}^{\text{opt}} = \left[\frac{2A_6}{\pi^{0.8} q^{0.8} b_6} \right]^{0.385}; \quad (18)$$

– при газоснабжении потребителей через резервуарные установки ($\beta=1$)

$$R_{\text{ГНС}}^{\text{opt}} = \left[\frac{2A_p}{\pi^{0.8} q^{0.8} b_p} \right]^{0.385}. \quad (19)$$

Оптимальная мощность газонаполнительной станции, т/год, определяется по формуле (9) с учетом $R_{\text{ГНС}}^{\text{opt}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целях численной реализации экономико-математической модели (1)-(19) методом вариантных расчетов было проведено определение оптимальных параметров региональных систем снабжения сжиженным газом при непосредственной реализации СУГ с газонаполнительной станции.

В расчетах использовались следующие исходные данные:

– плотность газопотребления на территории, прилегающей к станции: 1,0; 2,0, 4,0 т/(год км²);

– схема снабжения потребителей СУГ: от индивидуальных баллонных установок, от индивидуальных резервуарных установок, от групповых резервуарных установок, от индивидуальных баллонных и резервуарных установок, от индивидуальных баллонных и групповых резервуарных установок;

– характеристика дорожной сети: дороги с асфальтобетонным покрытием – 85 % пути, дороги со смешанным типом покрытия (переходный тип покрытия и грунтовые дороги) – 15 % пути;

– характер застройки населенного пункта – одноэтажная, усадебная (коттеджная) застройка, 50 % с компактной и 50 % с разбросанной планировкой;

– доля газа, реализуемая через резервуарные установки: $\beta = 0; 0,5; 1$.

Результаты определения затрат в региональную систему газоснабжения на базе газонаполнительных станций приводятся на рис.1-3.

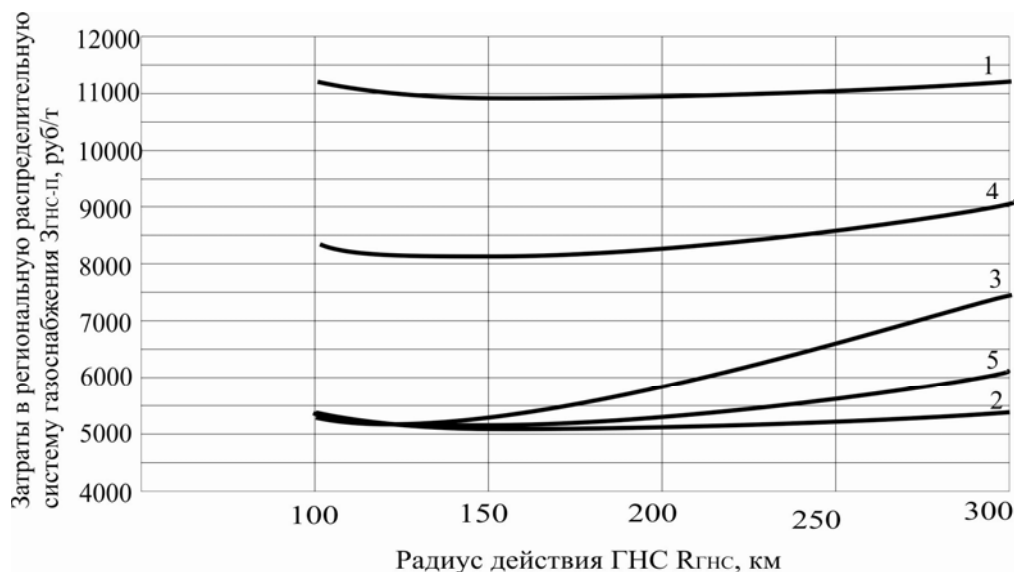


Рис. 1. Затраты в региональную распределительную систему снабжения сжиженным газом (плотность газопотребления $q=1,0$ т/(год·км²)):

1 – реализация газа через индивидуальные резервуарные установки ($\beta=1$); 2 – то же через групповые резервуарные установки ($\beta=1$); 3 – то же через индивидуальные баллонные установки ($\beta=0$); 4 – то же через индивидуальные баллонные и резервуарные установки ($\beta=0,5$); 5 – то же через индивидуальные баллонные и групповые резервуарные установки ($\beta=0,5$)

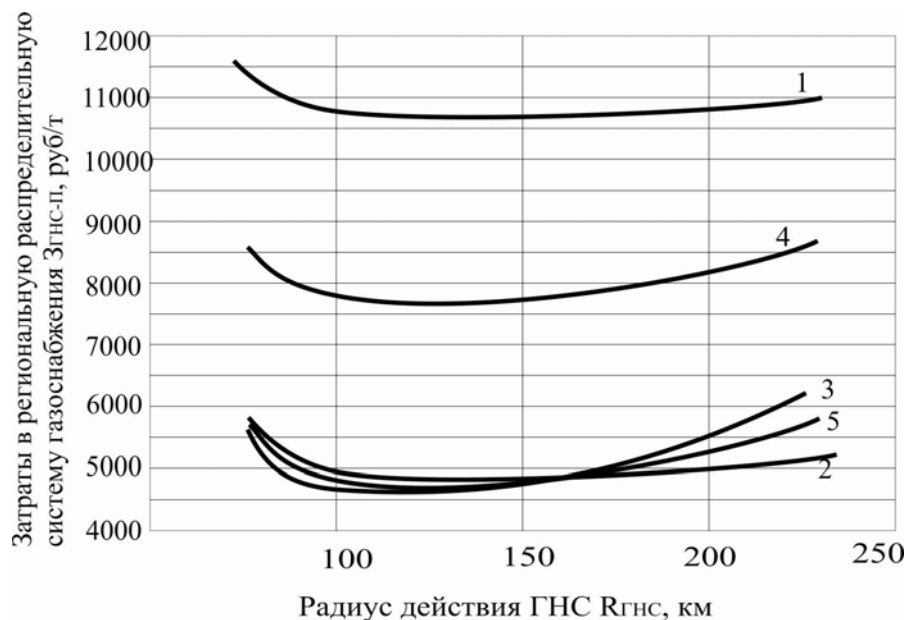


Рис. 2. Затраты в региональную распределительную систему снабжения сжиженным газом (плотность газопотребления $q=2,0$ т/(год·км²)):

1 – реализация газа через индивидуальные резервуарные установки ($\beta=1$); 2 – то же через групповые резервуарные установки ($\beta=1$); 3 – то же через индивидуальные баллонные установки ($\beta=0$); 4 – то же через индивидуальные баллонные и резервуарные установки ($\beta=0,5$); 5 – то же через индивидуальные баллонные и групповые резервуарные установки ($\beta=0,5$)

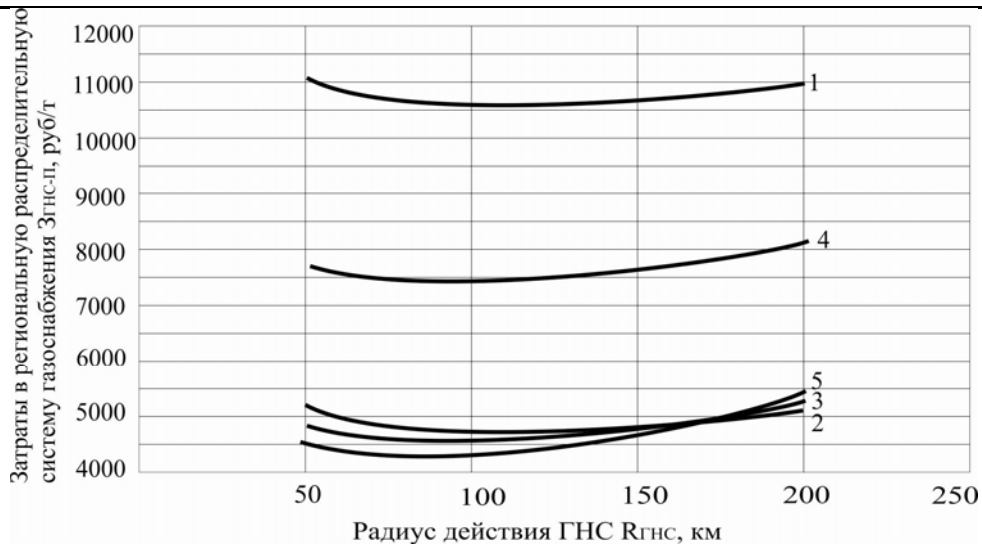


Рис. 3. Затраты в региональную распределительную систему снабжения сжиженным газом (плотность газопотребления $q=4,0$ т/(год·км²)):

- 1 – реализация газа через индивидуальные резервуарные установки ($\beta=1$); 2 – то же через групповые резервуарные установки ($\beta=1$); 3 – то же через индивидуальные баллонные установки ($\beta=0$); 4 – то же через индивидуальные баллонные и резервуарные установки ($\beta=0,5$); 5 – то же через индивидуальные баллонные и групповые резервуарные установки ($\beta=0,5$)

Как видно из графиков (см. рис. 1-3), оптимальный радиус действия ГНС R_0^{opt} зависит от плотности газопотребления и способа реализации сжиженного газа. С увеличением плотности газопотребления q от 1,0 до 4,0 т/(год·км²) оптимальный радиус действия станции изменяется в пределах от 75-120 до 113-180 км. Наибольший объем затрат обуславливает применение схемы реализации СУГ через индивидуальные резервуарные установки ($\beta=1$). В то же время схемы реализации СУГ через индивидуальные баллонные и групповые резервуарные установки взаимно конкурентоспособны. Как видно из графиков, при использовании СУГ на цели пищевого приготовления (пищеприготовление и горячее водоснабжение), то есть ($\beta=0$), при плотности газопотребления на территории, прилегающей к ГНС, $q \leq 1,0$ т/(год·км²) наиболее экономична резервуарная схема газоснабжения через групповые резервуарные установки. При большей плотности газопотребления ($q > 1,0$ т/(год·км²)) наиболее экономичный вариант снабжения сжиженным газом обеспечивается через индивидуальные баллонные установки.

При соотношении $0 \leq \beta \leq 1$ расчетные затраты варьируются в соответствующих пределах в зависимости от доли потребителей, использующих СУГ на все бытовые нужды (отопление, горячее водоснабжение, пищеприготовление).

Наличие значительной пологости целевых функций позволяет усреднить величину оптимального радиуса снабжения потребителей СУГ R_0^{opt} независимо от схемы последующей реализации СУГ. Введение расчетного радиуса действия ГНС обуславливает максимальную погрешность по приведенным затратам 1,74 %. При известной величине расчетного радиуса действия станции $R_0^{\text{расч}}$ расчетная мощность газонаполнительной станции при различных схемах снабжения потребителей СУГ определяется в соответствии с выражением (9).

Обобщающие рекомендации по определению параметров региональных систем газоснабжения приводятся на графиках (рис. 4).

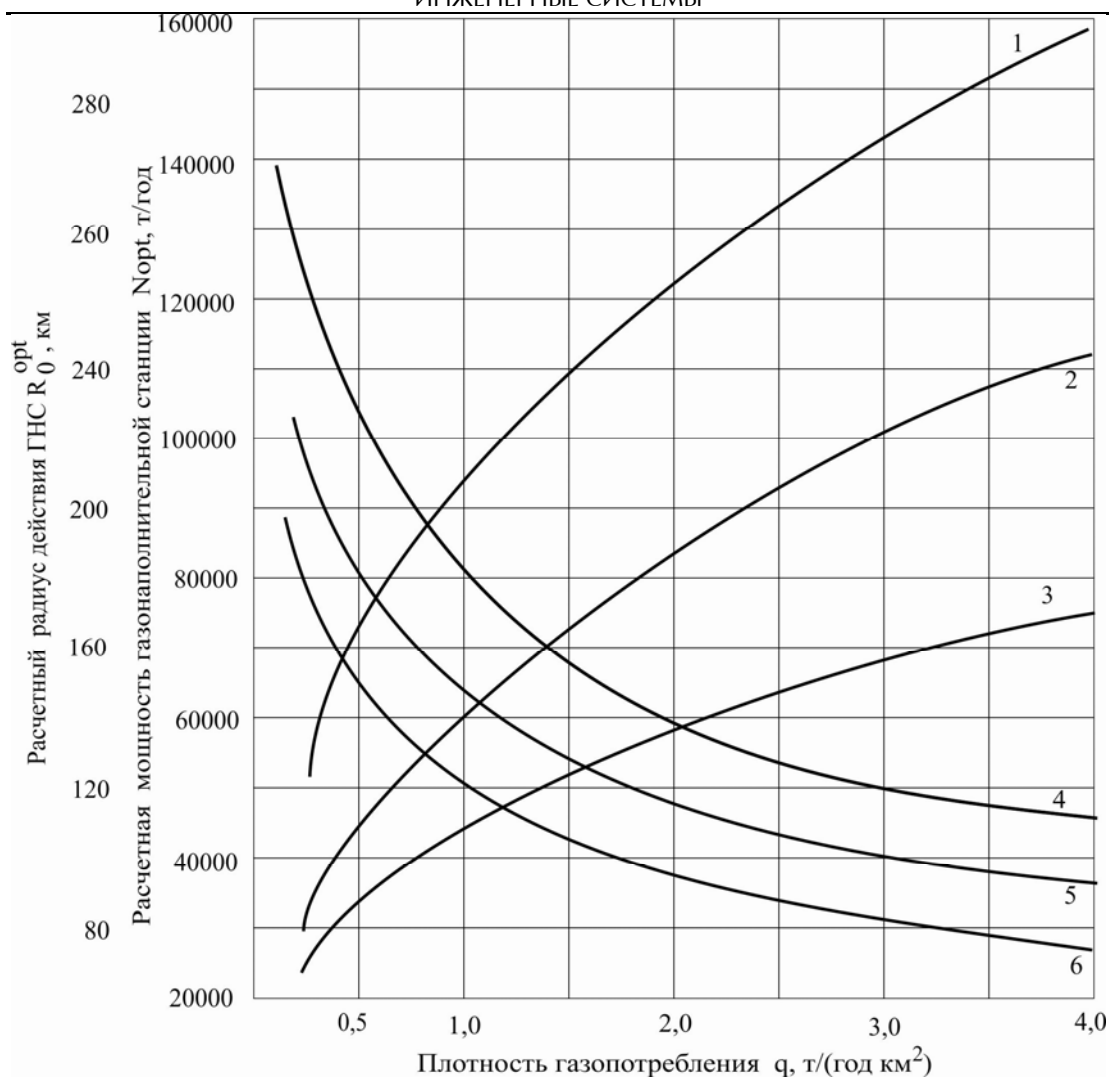


Рис. 4. Параметры газонаполнительной станции СУГ:

1 – мощность ГНС при реализации газа через резервуарные установки ($\beta=1$); 2 – мощность ГНС при реализации газа через индивидуальные баллонные и резервуарные установки ($\beta=0,5$); 3 – мощность ГНС при реализации газа через баллонные установки ($\beta=0$); 4 – радиус действия ГНС при реализации газа через резервуарные установки ($\beta=1$); 5 – радиус действия ГНС при реализации газа через индивидуальные баллонные и резервуарные установки ($\beta=0,5$); 6 – радиус действия ГНС при реализации газа через баллонные установки ($\beta=0$)

Как видно из графика (см. рис.4), расчетные значения радиуса действия ГНС определяются плотностью газопотребления на газоснабжаемой территории. С увеличением плотности газопотребления q от 1,0 до 4,0 т/(год·км²) радиус действия станции $R_0^{расч}$ уменьшается от 180 до 75 км, а расчетная мощность станции $N_{расч}$ увеличивается от 42 до 160 тыс.т/год.

ВЫВОДЫ

1. Организация снабжения потребителей сжиженным газом на базе крупных газонаполнительных станций является важным резервом повышения экономичности региональных (межпоселковых) систем газоснабжения.

2. Оптимальное функционирование одноступенчатых систем газоснабжения может быть осуществлено газонаполнительными станциями мощностью от 40 до 160 тыс.т/год с радиусом действия от 75 до 180 км (ГНС областного и межобластного характера).

Список литературы

1. Анализ рынка сжиженных углеводородных газов в России в 2006-2010 гг., прогноз на 2011-2015 гг.: аналит. отчет. – М.: BusinesStat, 2010. – 97 с.
2. Семенов, С. А. Инфраструктура транспортировки СУГ и СПГ. Транспортировка, хранение и перевалка нефти, сжиженных газов и нефтепродуктов / С.А. Семёнов. – СПб., 2010. – С. 25.
3. Земенкова, Ю.Д. Газонаполнительные и газораспределительные станции / Ю.Д. Земенкова. – Тюмень, 2002. – 335 с.
4. Рубинштейн, С.В. Газонаполнительные станции сжиженных углеводородных газов / С.В. Рубинштейн. – Л.: Недра, 1989. – 232 с.
5. Стаскевич, Н.Л. Газоснабжение городов / Н.Л. Стаскевич. – Ленинград: Недра, 1984. – 623 с.
6. Котельников, Н.С. Разработка комплексного метода оптимизации размещения станций газоснабжения сжиженным углеводородным газом / Н.С. Котельников, В.Н. Мелькумов, В.С. Турбин // Вестник ВГТУ. – Воронеж, 2002. – С. 65-68.
7. Рачевский, Б.С. Новая эффективная технология распределения сжиженных углеводородных газов / Б.С. Рачевский // АГЗК+АТ. – 2004. – №6 (18). – С. 12-14.
8. Рекомендации по проектированию и строительству систем газоснабжения малых и средних городов и населенных пунктов сельской местности. – Саратов: Гипрониигаз, 1985. – 144 с.
9. Рулев, А.В. Разработка алгоритма обоснования зон применения конкурирующих вариантов промышленных регазификаторов сжиженного газа в условиях неопределенности конвертирования ценовых факторов / А.В. Рулев, А.П. Усачёв // Промышленная энергетика. – 2012. – №10. – С. 26-30.
10. 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.

References

1. Analysis of liquefied hydrocarbon gases market in Russia in 2006-2010, forecast 2011-2015: Analyt. report. – M.: BusinesStat, 2010. – 97 p.
2. Semenov, S. A. Infrastructure-transport LHG and LPG. Transportation, storage and transshipment of liquefied gases, crude oil and petroleum products / S. A. Semenov. – SPb., 2010. – P. 25.
3. Semenkova, Y. D. Gas filling and distribution station / Y.D. Semenkova. – Tyumen, 2002. -335 p.
4. Rubinstein, C. V. Gas-filling station of liquefied petroleum gases / C. V. Rubinstein. – Leningrad, Nedra, 1989. – 232 p.
5. Stashkevich, N. L. Gas supply for cities / N. L. Staskevich. – L.: Nedra, 1984. – 623 p.
6. Kotelnikov, N.S. Development of a comprehensive method of optimizing the placement of the gas supply liquefied petroleum gas stantions / N.S. Kotelnikov, V.N. Melkumov, V. S. Turbin // Vestnik VGTU. – Voronezh, 2002. – P. 65-68.
7. Rachevsky, B. S. New efficient distribution technology corbohydrates liquefied natural gas / B. S. Rachevsky // AGZK+AT. – 2004. – №6 (18). – P. 12-14.
8. Recommendations for the design and construction of gas supply systems for twons, cities and vilages areas. – Saratov: Giproniigaz, 1985. – 144 p.
9. Rulev, A. V. Development of the algorithm of justification of the application areas for the invariants of regasification liquefied natural gas in conditions of the conversion price factors uncertainty / A. V. Rulev, A. P. Usachev // Promyshlennaya Energetika. – 2012. – No. 10. – P. 26-30.
10. Osipova, N. N. The rational choice of centralized and de-centralized systems scope of liquefied petroleum gas supply / N. N. Osipova // Construction and reconstruction. – 2011. – № 5(37). – P. 39-45.

Вологодский государственный университет
Россия, 160000, г. Вологда,
ул. Ленина, д. 15,
тел.: (8172) 72-46-45

Павлов Михаил Васильевич,
старший преподаватель кафедры
«Теплогасоснабжение и вентиляция»
E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Лукин Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
исполняющий обязанности зав. кафедрой
«Теплогасоснабжение и вентиляция»
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Кочкин Александр Александрович,
доктор технических наук, доцент,
декан инженерно-строительного
факультета
E-mail: aakochkin@mail.ru

Vologda State University
Russia, 160000, Vologda, 15, Lenin St.,
tel.: (8172) 72-46-45

Pavlov Mikhail Vasil'evich,
Senior Teacher of the department «Heat and
Gas Supply and Ventilation»
E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Lukin Sergey Vladimirovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Acting Head of the department «Heat and Gas
Supply and Ventilation»
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Kochkin Aleksandr Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Dean of Civil Engineering Faculty
E-mail: aakochkin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЦЫ

М.В. Павлов, С.В. Лукин, А.А. Кочкин

Рассмотрены и проанализированы основные результаты численного решения системы уравнений теплового и материального балансов теплицы и почвы при лучистом отоплении на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5». Приведено описание полученных графиков и дано объяснение характеру изменения зависимых величин от переменных значений в сравнении с традиционным отоплением.

Ключевые слова: лучистое отопление, тепловой и материальные балансы, теплица, инфракрасный излучатель, почва

RESEARCH ON VARIOUS EFFECTS PRODUCED ON GREENHOUSE RADIANT HEATING PARAMETERS

M.V. Pavlov, S.V. Lukin, A.A. Kochkin

The article presents the main results of the simultaneous equations numerical solution of heat and mass balance of a greenhouse and soil which is heated radiantly using the industrial greenhouse 'Fermer 7.5' as an example. The description of the obtained graphs and explain atcons of behavior of the dependant variables in comparison with conventional heating are given.

Keywords: radiant heating, thermal and material balances, greenhouse, infrared emitter, soil

Введение. Для выращивания растений в закрытом грунте необходимо создание в теплице соответствующих благоприятных условий. Последние определяются параметрами микроклимата помещения и тепловлажностным режимом почвы. В настоящее время существует большое количество способов обогрева сельскохозяйственных объектов, к которым можно отнести воздушное, комбинированное водо- и газоз-душное отопление и др. Все они имеют свои достоинства и недостатки, а также область применения. Например, воздушное отопление теплиц в связи со значительным охлаждением воздуха, нагретого до сравнительно высоких температур, по длине воздуховода в основном используется в южных районах нашей страны. Благодаря ряду отличительных преимуществ [1] – возможное снижение температуры воздуха в помещении без ухудшения теплового комфорта; точечный и (или) зональный обогрев почвы; сокращение переноса пыли и вредных выделений и др. – в теплицах также

применяются системы лучистого отопления. С появлением новых систем обогрева почвы возникает закономерная необходимость разработки методики их расчета, которая бы учитывала происходящие в теплицах процессы тепломассопереноса.

Теоретический анализ. Любая методика расчета системы отопления, как известно, строится на предварительном составлении и решении уравнения теплового баланса помещения, что в итоге позволяет определить требуемую тепловую мощность всей отопительной системы. Если коснуться отдельно теплового баланса помещения при лучистом отоплении, то можно заметить, что судя по учебной литературе [2, 3] и научным публикациям [4, 5], данный вопрос рассмотрен только в некоторой степени. Расчетные уравнения существуют, однако методика их решения либо отсутствует, либо, на наш взгляд, является недостаточно корректной. Кроме того, в большинстве таких работ не приводятся какие-либо конкретные примеры ее реализации. Имеются отдельные случаи [6], но они не адаптированы для расчета лучистого отопления теплиц и других сельскохозяйственных объектов. Большой проблемой также остается учет массообменных процессов, а также их влияния на значения тепловых потоков.

Методика. Система уравнений теплового и материального балансов теплицы и почвы ранее рассмотрена в работе [7]. В статье дано описание расчетной схеме теплового и материального балансов теплицы при лучистом отоплении, приведены формулы для расчета тепловых и массовых потоков. В настоящий момент времени данная система уравнений претерпела ряд изменений: введено уравнение теплового баланса ограждения теплицы; учтена лучистая составляющая теплообмена в уравнении теплового баланса почвы; уточнены формулы для расчета тепловых потерь через ограждение теплицы и в грунт.

Уравнение теплового баланса ограждения теплицы имеет вид:

$$Q_{\text{огр}} = \left(1 - \frac{A_1}{1 - k_{\text{огр}}} \right) Q_{\text{изл}} + Q_{\text{луч}} + Q_{\text{конв2}}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $k_{\text{огр}} = (1 - A_1)(1 - A_2) \frac{\varphi_{21}}{1 - \varphi_{22}(1 - A_2)}$ – коэффициент, учитывающий многократное

отражение теплового излучения от поверхности почвы и внутренней поверхности ограждения теплицы в результате самооблучений; A_1 и A_2 – соответственно коэффициенты поглощения поверхности почвы и внутренней поверхности ограждения теплицы; φ_{21} – коэффициент облученности с внутренней поверхности ограждения теплицы на поверхность почвы; φ_{22} – коэффициент самооблученности внутренней поверхности ограждения теплицы; $Q_{\text{изл}}$ – расчетная тепловая мощность инфракрасного излучения, Вт; $Q_{\text{луч}}$ – результирующий тепловой поток от теплообмена излучением между поверхностью почвы и внутренней поверхностью ограждения теплицы, Вт; $Q_{\text{конв2}}$ – тепловой поток от конвективного теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения теплицы, Вт.

Результирующий тепловой поток $Q_{\text{луч}}$ от теплообмена излучением между поверхностью почвы и внутренней поверхностью ограждения теплицы при условии, что $t_{\text{пов}} > t_{\text{огр}}$ и $\varphi_{12} = 1$ (все тепловое излучение, идущее с поверхности почвы, попадает на внутреннюю поверхность ограждения теплицы), определяется по закону Стефана – Больцмана (форма записи для инженерных расчетов):

$$Q_{\text{луч}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр12}} F_{\text{пов}} \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{огр}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (2)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{пр12}}$ – приведенный относительный коэффициент теплового излучения поверхности

почвы и внутренней поверхности ограждения теплицы; $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности почвы, м^2 ; $T_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} + 273,15$ и $T_{\text{огр}} = t_{\text{огр}} + 273,15$ – соответственно абсолютная температура поверхности почвы и внутренней поверхности ограждения теплицы, К; $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{огр}}$ – соответственно температура поверхности почвы и внутренней поверхности ограждения теплицы, $^{\circ}\text{C}$.

Конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения теплицы рассчитывается по закону конвективного теплообмена (по закону Ньютона – Рихмана):

$$Q_{\text{конв2}} = \alpha_{\text{вн}} (t_{\text{вн.в}} - t_{\text{огр}}) F_{\text{огр}}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{\text{вн.в}}$ – температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $F_{\text{огр}}$ – суммарная площадь ограждения теплицы, м^2 .

Тепловые потери через ограждение теплицы при лучистом отоплении определяются следующим образом:

$$Q_{\text{огр}} = \frac{t_{\text{огр}} - t_{\text{н.в}}}{R_t} F_{\text{огр}} (1 + \beta_{\text{инф}}), \text{ Вт}, \quad (4)$$

где $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; R_t – термическое сопротивление теплопередаче ограждения теплицы, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\beta_{\text{инф}}$ – коэффициент инфильтрации наружного воздуха, для теплиц обычно принимается равным 0,2.

С учетом формулы (4) термическое сопротивление теплопередаче ограждения теплицы будет равно:

$$R_t = R_{\text{огр}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}, \quad (5)$$

где $R_{\text{огр}}$ – термическое сопротивление ограждения теплицы, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения, $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Тепловые потери в глубинные горизонты грунта при лучистом отоплении теплицы находятся по формуле

$$Q_{\text{гр}} = (t_{\text{пов}} - t_{\text{н.в}}) \sum_{i=1}^{\text{IV}} \left(\frac{F_i}{R_{t,i} - 1/\alpha_{\text{вн}}} \right), \text{ Вт}, \quad (6)$$

где F_i – расчетная площадь i -й зоны грунта, м^2 ; $R_{t,i}$ – термическое сопротивление i -й зоны грунта, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Для первой зоны равно $R_{t,1} = 2,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для второй – $R_{t,2} = 4,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для третьей – $R_{t,3} = 8,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для четвертой – $R_{t,4} = 14,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Прочие уравнения теплового и материального балансов теплицы и почвы, представленные в работе [7], оставлены без изменений.

Расчетная часть. Рассмотрим некоторые результаты численного решения системы уравнений теплового и материального балансов теплицы и почвы при лучистом отоплении на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (компания ООО «Воля», Красногорский район, Московская область). Схема и конструктивные размеры теплицы, а также расчетные условия приведены в [7].

На рис. 1 изображен график изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$, °C, в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{\text{н.в}}$, °C, при различных значениях кратности воздухообмена $n_{\text{в}}$, м³/ч на 1 м².

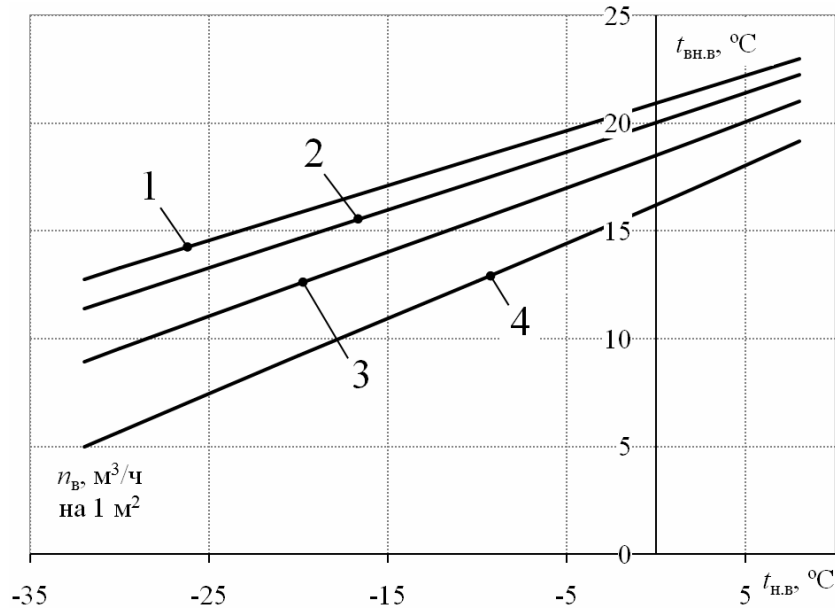


Рис. 1. Температура внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}} = t_{\text{вн.в}}(t_{\text{н.в}})$:
 1 – $n_{\text{в}} = 2,5$ м³/ч на 1 м²; 2 – $n_{\text{в}} = 5,0$ м³/ч на 1 м²; 3 – $n_{\text{в}} = 10,0$ м³/ч на 1 м²;
 4 – $n_{\text{в}} = 20,0$ м³/ч на 1 м²

График на рис. 1 наглядно показывает, что с уменьшением температуры наружного воздуха $t_{\text{н.в}}$, °C, происходит соответствующее падение температуры воздуха в теплице $t_{\text{вн.в}}$, °C, и наоборот. Например, при кратности воздухообмена $n_{\text{в}} = 2,5$ м³/ч на 1 м² и температуре окружающей среды, равной $t_{\text{н.в}} = 8$ °C, температура внутреннего воздуха будет равна $t_{\text{вн.в}} = 23,0$ °C, а при $t_{\text{н.в}} = -32$ °C она упадет до величины $t_{\text{вн.в}} = 12,8$ °C, т. е. снизится на 10,2 °C. Кроме того, с увеличением кратности воздухообмена в помещении изменение температуры внутреннего воздуха будет происходить быстрее, и наоборот. В диапазоне температур наружного воздуха $t_{\text{н.в}} \in [-32; 8]$ °C получены следующие результаты: при $n_{\text{в}} = 2,5$ м³/ч на 1 м² – 0,26 °C на 1 °C изменения температуры наружного воздуха; при $n_{\text{в}} = 5,0$ м³/ч на 1 м² – 0,27 °C; при $n_{\text{в}} = 10,0$ м³/ч на 1 м² – 0,30 °C; при $n_{\text{в}} = 20,0$ м³/ч на 1 м² – 0,35 °C.

Все эти процессы характерны для инфракрасно-лучистого обогрева помещений. В отличие от традиционных систем отопления, в которых поддержание температуры внутреннего воздуха на уровне оптимальных или допустимых значений возможно либо за счет изменения температуры поверхности отопительных приборов через изменение температуры теплоносителя (водяное отопление), либо посредством регулирования температуры предварительно нагретого приточного воздуха (воздушное отопление), при лучистом отоплении достигнуть постоянного теплового режима помещения достаточно сложно. Здесь при условии поддержания заданной температуры облучаемой поверхности (в данном случае поверхности почвы) температура внутреннего воздуха является зависимой величиной. При уменьшении температуры наружного воздуха увеличиваются в первую очередь тепловые потери через ограждение помещения, что и приводит к снижению температуры внутреннего воздуха. При увеличении же кратности воздухообмена в теплице происходит существенный рост

потерь теплоты с уходящим из помещения вентиляционным воздухом, что также отражается на уменьшении температуры внутреннего воздуха.

На рис. 2 показана зависимость между термическим сопротивлением ограждения теплицы $R_{\text{огр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, и требуемой мощностью теплового излучения $q_{\text{изл}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, отнесенной к единице площади поверхности почвы $F_{\text{пов}}$, м^2 . Так как линии графика имеют форму гиперболы, то данные величины между собой обратно пропорциональны. Аналитически это подтверждается расчетными зависимостями (4) и (6), которые входят в состав уравнения теплового баланса теплицы.

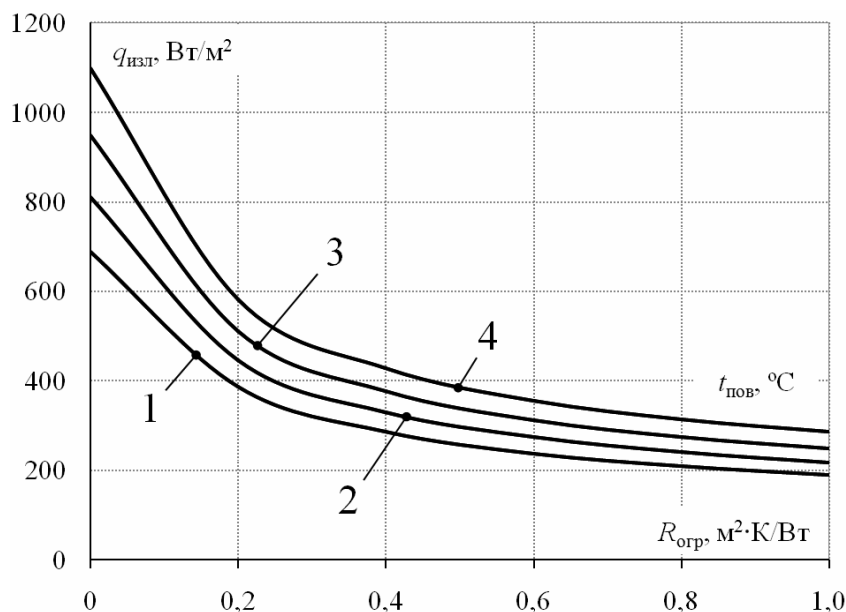


Рис. 2. Плотность лучистого теплового потока $q_{\text{изл}} = q_{\text{изл}}(R_{\text{огр}})$:
 1 – $t_{\text{пов}} = 15^\circ\text{C}$; 2 – $t_{\text{пов}} = 20^\circ\text{C}$; 3 – $t_{\text{пов}} = 25^\circ\text{C}$; 4 – $t_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$

Так как основные потери теплоты в теплице происходят через ее ограждение, то плотность лучистого потока $q_{\text{изл}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, исходя из уравнения теплового баланса теплицы, будет зависеть, прежде всего, от их величины. С увеличением термического сопротивления ограждения $R_{\text{огр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, трансмиссионные тепловые потери в теплице начнут резко снижаться, а значит, и требуемая мощность лучистого отопления. Например, при температуре поверхности почвы $t_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$: для $R_{\text{огр}} = 0$ – требуемая плотность теплового излучения равна $q_{\text{изл}} = 1099 \text{ Вт}/\text{м}^2$; для $R_{\text{огр}} = 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ – $q_{\text{изл}} = 582 \text{ Вт}/\text{м}^2$; для $R_{\text{огр}} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ – $q_{\text{изл}} = 356 \text{ Вт}/\text{м}^2$; для $R_{\text{огр}} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ – $q_{\text{изл}} = 285 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Влияние температуры поверхности почвы $t_{\text{пов}}$, $^\circ\text{C}$, на значение величины $q_{\text{изл}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, не так существенно, так как потери теплоты через ограждение теплицы связаны с ней косвенно: через температуру $t_{\text{вн.в}}$, $^\circ\text{C}$, при конвективном теплообмене с внутренним воздухом (3) и температуру внутренней поверхности ограждения $t_{\text{огр}}$, $^\circ\text{C}$ – при теплообмене излучением (2).

Если сравнивать в рассматриваемом аспекте лучистое и традиционное отопление, то здесь суть физического процесса абсолютно одинакова: мощность отопительной системы в основном определяется трансмиссионными тепловыми потерями, которые обратно пропорциональны величине $R_{\text{огр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Связь между коэффициентом орошения $k_{ор}$ (показатель, учитывающий масштаб орошения почвы в теплице) и удельным расходом воды на полив 1 м^2 почвы $g_{пол}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, показана на рис. 3.

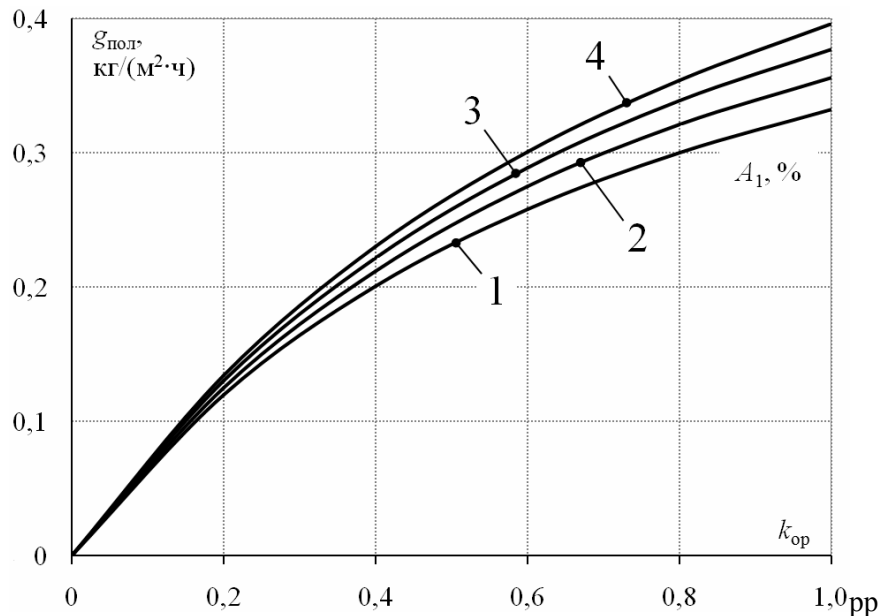


Рис. 3. Интенсивность полива почвы $g_{пол} = g_{пол}(k_{ор})$:
1 – $A_1 = 65\%$; 2 – $A_1 = 75\%$; 3 – $A_1 = 85\%$; 4 – $A_1 = 95\%$

Очевидно, что с увеличением коэффициента орошения $k_{ор}$ возрастет площадь полива почвы в теплице, а значит, и количество потребляемой воды. Так, например, при коэффициенте поглощения $A_1 = 65\%$ и $k_{ор} = 0$ плотность полива почвы будет равна $g_{пол} = 0$; при $k_{ор} = 0,4$ – $g_{пол} = 0,201 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; при $k_{ор} = 0,8$ – $g_{пол} = 0,300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; при $k_{ор} = 1$ – $g_{пол} = 0,332 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Следует отметить, что по мере увеличения коэффициента $k_{ор}$ усиливается влияние поглощательной способности почвы. Если при коэффициенте орошения $k_{ор} = 0,2$ в интервале значений $A_1 \in [65; 95]\%$ плотность полива почвы изменяется на величину $0,014 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, то при $k_{ор} = 1$ это изменение уже составляет $0,064 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (больше в 4,5 раза). Чем больше теплоты поглощает слой почвы, тем интенсивнее протекают процессы испарения влаги на ее поверхности. Это требует увеличение расхода воды на полив почвы во избежание ее осушения, особенно при больших значениях коэффициента орошения $k_{ор}$.

Выводы. Результаты проделанной работы позволяют оценить и предугадать характер изменения таких важных параметров теплицы, как температура внутреннего воздуха, требуемая мощность отопительной системы и др., при переменных факторах окружающей среды. Полученные графики также могут быть использованы при создании инженерной методики расчета лучистого отопления теплицы и других подобных сельскохозяйственных объектов. В основу данной методики может быть положено определение с помощью построенных графиков базовых удельных показателей $q_{изл}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, и $g_{пол}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, с последующей корректировкой их значений через поправочные коэффициенты, найденные для заданной теплицы с учетом ее конструктивных, теплотехнических, аэродинамических и других параметров.

1. СТО НП АВОК 4.1.5–2006. Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. – М., 2007.
2. Сканави, А.Н. Отопление / А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1988. – 416 с.
3. Климов, В.В. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств / В.В. Климов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.
4. Дыскин, Л.М. Тепловой баланс помещения с газовым лучистым отоплением / Л.М. Дыскин, В.В. Шиванов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – №8. – С. 62–65.
5. Бухмиров, В.В. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Ю.С. Солнышкова // Вестник ИГЭУ. – 2010. – №4. – С. 23–25.
6. СТО Газпром 2-1.9-440–2010. Методика расчета систем лучистого отопления. – М., 2010.
7. Павлов, М.В. Тепловой и материальный балансы теплицы при лучистом отоплении / М.В. Павлов, С.В. Лукин, А.А. Кочкин // Бюллетень строительной техники (БСТ). – 2017. – №6. – С. 40–42.

References

1. STO NP AVOK 4.1.5–2006. Heating systems with gas and infrared emitters. – M., 2007.
2. Skanavi, A.N. Heating / A.N. Skanavi. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 416 p.
3. Klimov, V.V. Equipment of greenhouses for subsidiary and personal farms / V.V. Klimov. – M.: Energoatomizdat, 1992. – 96 p.
4. Dyskin, L.M. Heat balance of the premises with gas rays heating / L.M. Dyskin, V.V. Shivanov // Proceedings of the higher educational institutions. Civil engineering. – 2007. – №8. – P. 62–65.
5. Buhmirov, V.V. Algorithm for Solution of Radiant Heating Premises Systems / V.V. Buhmirov, S.A. Krupennikov, Ju.S. Solnyshkova // Vestnik IGEU. – 2010. – №4. – P. 23–25.
6. STO Gazprom 2-1.9-440–2010. Radiant heating calculation method. – M., 2010.
7. Pavlov, M.V. Thermal and material balances of a greenhouse under radiant heating / M.V. Pavlov, S.V. Lukin, A.A. Kochkin // Bulletin of Construction Equipment. – 2017. – №6. – P. 40–42.

УДК 541.135. 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

Кузина Валентина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор,
советник РААСН, действительный член
Нью-Йоркской академии наук и Академии
информатизации образования, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Information and
computing systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Koshev Alexander Nikolaevich,
Doctor of Chemistry Science, Professor,
Adviser of the Russian Academy of
Architectural and Building Sciences full
member of the New York Akademy of
Sciences and Akademy of information of
education, Professor of the department
«Information and computing systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В.В. Кузина, А.Н. Кошев

На основе методов математического моделирования предложен алгоритм решения задачи по определению параметров поля переноса пассивной примеси (температуры, энтальпии, концентрации) в ограниченном пространстве при решении задач строительства. Приведены результаты и обсуждение компьютерного эксперимента, соответствующего решению некоторой модельной задачи.

Ключевые слова: задачи строительства, перенос пассивной примеси, определение полей температур и концентраций примесей в ограниченном пространстве, вычислительный эксперимент, математическое моделирование

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF PASSIVE IMPURITY TRANSFER IN CONFINED SPACE

V.V. Kuzina, A.N. Koshev

The algorithm for solving the task of determination of parameters of the field of transfer of passive impurity (temperature, enthalpy, concentration) in a confined space when solving the tasks of construction on the basis of mathematical modeling methods. The results and discussion on the computer simulation corresponding to the solution of a model problem are given is proposed.

Keywords: task of building, transfer of passive impurity, definition of fields of temperature and concentrations in confined space, computing experiment, mathematical modeling

Одной из актуальных задач отопительно-вентиляционной техники является расчет полей температур и концентраций примесей в потоках воздуха или воды. Подобные задачи возникают, например, при исследовании и проектировании производственных помещений, где имеется необходимость обеспечения высокого класса чистоты воздуха с жесткими ограничениями на концентрацию загрязняющих веществ, температуру и влажность. Традиционно используемые при решении таких задач инженерные методики, основанные на некоторых простых решениях уравнений теплообмена, не всегда дают описание адекватной картины воздушных течений в помещении. С другой

стороны, более надежное лабораторное или физическое моделирование этих процессов может оказаться достаточно дорогим.

Мощным и эффективным средством описания атмосферных течений в сложных областях является численное моделирование.

При решении практических задач, связанных с переносом теплоты, в первую очередь надо рассматривать физическую суть процесса, выделяя доминирующий вид теплообмена. При этом необходимо учитывать, что, во-первых, элементарные способы переноса теплоты, как правило, протекают совместно и, во-вторых, теплообмен в твердых телах (внутренняя задача) и тепломассообмен в окружающей текучей среде (внешняя задача) происходят одновременно, что требует совместного решения внутренней и внешней задач теплообмена (сопряженная задача) [1].

Для многих практических случаев задача может сводиться к расчету переноса пассивной величины F – температуры, концентрации, энтальпии – в турбулентном потоке. Нами проводилось исследование [2] процессов распространения вещества в водной среде.

Целью работы являлась разработка численного алгоритма расчета полей температур и концентраций примесей в потоках воздуха или воды.

Конвекция теплоты происходит за счет перемещения макрообъемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвективный теплообмен (сочетание конвекции и теплопроводности) наблюдается в текучих средах.

Анализ формулы для расчета плотности теплового потока при конвективном теплообмене показывает, что необходимо предварительно рассчитать не только температурное поле текучей среды, но и поле скорости перемещения некоторого объема вещества.

В зависимости от причины, вызывающей перемещение в пространстве текучей среды, различают вынужденную конвекцию (при вынужденном движении) и свободную конвекцию (при свободном движении).

При вынужденной конвекции движение текучей среды происходит под действием внешней силы – разности давлений в потоке, которую создает какое-либо транспортирующее флюид устройство, например вентилятор, насос и т.п. При свободной конвекции наблюдается движение среды без приложения внешней силы к флюиду, вследствие разности плотностей различных объемов среды, которая может возникать из-за переменного поля температуры, т.к. плотность зависит от температуры: $\rho = f(T)$. Неравномерное поле температур создает переменное поле плотности, и вследствие этого в поле земного тяготения происходит перемещение масс с разной плотностью (легкие слои поднимаются вверх, тяжелые – опускаются вниз). В этом случае говорят о свободной тепловой, или естественной, конвекции. Следует заметить, что переменная по объему плотность текучей среды может быть создана и при механическом перемешивании сред с различной плотностью (например при продувке жидкой стальной ванны кислородом).

В зависимости от интенсивности движения некоторого объема вещества различают два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. Для большинства флюидов существует и переходный (от ламинарного к турбулентному) режим течения [1].

Напомним признаки ламинарного режима течения:

- частицы среды движутся по плавным взаимно непересекающимся траекториям;
- параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются гладкими функциями координат и времени;
- перенос субстанции (теплота, импульс и масса) происходит за счет взаимодействия микрочастиц среды – атомов, молекул, ионов и т.п. Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент температуропроводности, кинематический коэффициент вязкости и коэффициент диффузии) являются физическими характеристиками вещества. Коэффициенты переноса субстанции для разных веществ определяют экспериментально и в зависимости от температуры приводят в справочниках.

Признаки турбулентного режима течения:

- частицы среды движутся по сложным, ломаным, взаимно пересекающимся траекториям;
- параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются пульсирующими функциями координат и времени;
- перенос субстанции (теплота, импульс и масса) происходит за счет взаимодействия макрообъемов среды (турбулентных молей). Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент температуропроводности, кинематический коэффициент вязкости и коэффициент диффузии) зависят от самого режима движения и не являются физическими характеристиками вещества. Традиционно коэффициенты турбулентного переноса субстанции рассчитывают по так называемым полуэмпирическим моделям турбулентности [1].

Существование ламинарного или турбулентного режима течения определяется соотношением силы инерции $f_{ин}$ и силы трения $f_{тр}$, действующих в текучей среде. Ламинарный режим течения флюида существует при условии $f_{ин} \ll f_{тр}$, турбулентный режим – соответственно при $f_{ин} \gg f_{тр}$.

В расчетах конвективного теплообмена для характеристики однофазной химически однородной текучей среды используют три параметра:

- поле температуры $T(x_i, \tau)$;
- поле скорости $v(x_i, \tau) = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}$;
- поле давления $p(x_i, \tau)$,

где x_i – ортогональная система координат; τ – время.

При этом физические свойства среды (плотность, теплоемкость, коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности) предполагаются известными.

Для расчета температуры, давления и в общем случае трех составляющих вектора скорости необходимо решить следующие дифференциальные уравнения конвективного теплообмена:

- дифференциальное уравнение переноса энергии в текучей среде – уравнение Фурье – Кирхгофа;
- дифференциальное уравнение переноса импульса в текучей среде – уравнение Навье – Стокса для трех составляющих вектора скорости;
- дифференциальное уравнение неразрывности (сплошности).

Для выделения единственного решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена необходимо задать:

- размеры расчетной области: ее геометрию и время процесса конвективного теплообмена;
- физические свойства текучей среды;
- закон изменения внутренних источников теплоты (в частном случае внутренние источники в текучей среде отсутствуют);
- начальные и граничные условия.

Начальные условия задают распределение температуры, скорости и давления в начальный момент времени процесса конвективного теплообмена во всей расчетной области.

Граничные условия необходимо задать на свободных (вход и выход потока) и твердых, ограничивающих течение флюида поверхностях для параметров, входящих в дифференциальные уравнения энергии (могут иметь вид граничных условий I–IV родов).

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена с соответствующими условиями однозначности в общем случае не получено.

Аналитические решения для ограниченного числа частных случаев конвективного теплообмена при ламинарном течении флюида указаны в специальной литературе [1]. В настоящее время для моделирования теплообмена в текучих средах применяются численные методы решения системы дифференциальных уравнений конвективного

теплообмена, оформленные в виде вычислительных комплексов (пакетов прикладных программ).

На сегодняшний день инженерные методы расчета конвективного теплообмена основаны на информации, полученной в результате проведения лабораторного или промышленного эксперимента. При этом при постановке опытов и математической обработке экспериментальных данных используют теорию подобия физических процессов, методологической базой для которой служит система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

В работе [3] предложена модель расчета, когда источник теплоты (массы) расположен по всей поверхности канала (трубы). Однако часто встречаются случаи, когда источник занимает только часть поверхности либо осевой линии и т.д., т.е. существенно меньше размеров основного течения.

Здесь предлагается разделить решение задачи по расчету поля на два этапа. Сначала определяются поля осредненных скоростей и характеристик турбулентности [3, 4]. Для многих важных инженерных случаев (пограничные слои, пристенные струи, течения в трубах, каналах и т.д.) указанные величины известны, и тогда расчеты по первому этапу существенно упрощаются.

На втором этапе находится распределение функции F на основе решения уравнения переноса эллиптического типа, записанного в цилиндрических координатах (x, y) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x F) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y}(y \rho v_y F) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \gamma \frac{\partial F}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial(F \rho v_x)}{\partial x} &= \rho v_x \frac{\partial F}{\partial x} + F \frac{\partial \rho v_x}{\partial x}; \quad \frac{\partial(F \rho v_y)}{\partial x} = F \frac{\partial \rho v_y}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial F}{\partial x}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial F}{\partial x} \right) &= \frac{\partial \gamma}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial F}{\partial y} \right) &= \frac{\partial \gamma}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial y} + \gamma \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность; γ – коэффициент турбулентного переноса; v_x и v_y – проекции осредненных скоростей в направлениях x и y . В качестве области решения был взят плоский прямоугольник (рис. 1).

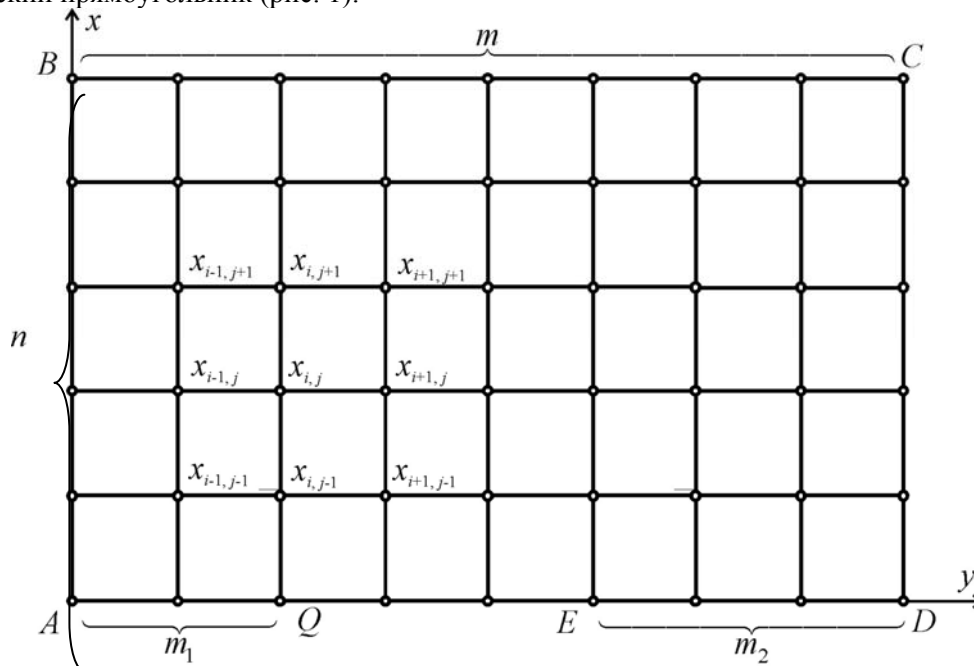


Рис. 1. Схема расчетной области, принято $y = r$

На границе области $ABCD$ заданы следующие значения искомой функции:

$$F = \text{const} \quad \text{на } AB, \quad BC, \quad QE;$$

$$\frac{\partial F}{\partial N} = 0 \quad \text{на } AQ, \quad ED, \quad CD,$$

где N – внутренняя нормаль к линии AD .

Таким образом, математическая модель процесса распределения расчетной величины является смешанной краевой задачей для эллиптического уравнения.

Система уравнений (1) решается конечно-разностным методом с использованием аппроксимации первых и вторых производных искомой функции и переменных коэффициентов в конечно-разностной форме. Это позволяет свести задачу к системе линейных алгебраических уравнений большой размерности ленточного типа. Задача решалась на регулярной квадратной сетке (рис. 2).

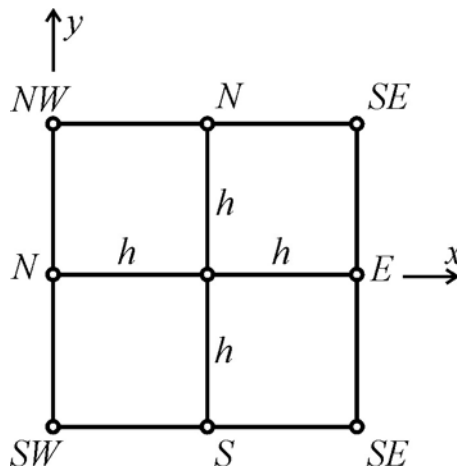


Рис. 2. Сетка разностной аппроксимации производных

Первые и вторые производные неизвестной функции F и зависимостей v_x, v_y, γ от координат x, y ($y = r$) вычислялись по известным формулам численного дифференцирования:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F(E) - F(W)}{2h}; \quad \frac{\partial F}{\partial y} \approx \frac{F(S) - F(N)}{2h};$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \approx 2 \left[\frac{F(E)}{2h^2} - \frac{F(P)}{h^2} + \frac{F(W)}{2h^2} \right]; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \approx 2 \left[\frac{F(S)}{2h^2} - \frac{F(P)}{h^2} + \frac{F(N)}{2h^2} \right]. \quad (2)$$

Составим систему линейных уравнений путем аппроксимации (1) с помощью разностной схемы (2). Тогда $h = x_{i,j} - x_{i-1,j} = x_{i,j} - x_{i,j-1}$ и т.д.

Для составления системы линейных уравнений используем приближения:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x_{i,j}) = \frac{F(x_{i-1,j}) - F(x_{i+1,j})}{2h};$$

$$\frac{\partial F}{\partial y}(x_{i,j}) = \frac{F(x_{i,j+1}) - F(x_{i,j-1})}{2h};$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}(x_{i,j}) = 2 \left[\frac{F(x_{i+1,j})}{2h^2} - \frac{F(x_{i,j})}{h^2} + \frac{F(x_{i-1,j})}{2h^2} \right];$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}(x_{i,j}) = 2 \left[\frac{F(x_{i,j+1})}{2h^2} - \frac{F(x_{i,j})}{h^2} + \frac{F(x_{i,j-1})}{2h^2} \right];$$

$$F(x_{i,j}) = \text{const} = c_1; \quad \frac{\partial F}{\partial N}(x_{n,j}) = 0; \quad F(x_{i,m}) = \text{const} = c_2;$$

$$i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m;$$

$$F(x_1, k) = \text{const} = c_3; \quad k = m_1, \dots, m_2; \quad \frac{\partial F}{\partial N}(x_1, k) = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial N}(x, k) = 0;$$

$$k = 1, \dots, m_1 - 1; \quad k = m_2 + 1, \dots, m. \quad (3)$$

Система линейных уравнений (3) вида $\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{f}$ решалась методом Зейделя с хорошей сходимостью для решаемого класса задач.

Пусть $\mathbf{F}^{(n)}$ – вектор неизвестных, найденный на n -й итерации. Тогда по методу Зейделя

$$\mathbf{F}^{(n+1)} = \mathbf{D}^{-1} [-\mathbf{M}\mathbf{F}^{(n+1)} - \mathbf{N}\mathbf{F}^{(n)} + \mathbf{f}],$$

где $\mathbf{D}$ – диагональная матрица; $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ – соответственно нижняя и верхняя треугольные матрицы, такие, что матрица коэффициентов при неизвестных $\mathbf{A} = \mathbf{D} + \mathbf{M} + \mathbf{N}$; $\mathbf{f}$ – вектор-столбец свободных членов. Для отыскания $\mathbf{D}$, $\mathbf{M}$, $\mathbf{N}$ существуют хорошо изученные методы.

Приведем систему линейных уравнений (3) к виду, необходимому для численного решения описанным методом. Предварительно введем обозначения:

$$\begin{aligned} K1(i, j) &= \left[\frac{\rho v_x(i, j)}{2h} - \frac{\gamma(i, j-1) - \gamma(i, j+1)}{4h^2} - \frac{4\gamma(i, j)}{h^2} \right]; \\ K2(i, j) &= \left[\frac{\rho v_y(i, j)}{2h} - \frac{\gamma(i+1, j-1) - \gamma(i-1, j)}{4h^2} - \frac{\gamma(i, j)}{h^2} \right]; \\ K3(i, j) &= \left[\frac{v_x(i, j-1) - v_x(i, j+1)}{2h} + \frac{v_y(i+1, j) - v_y(i-1, j)}{2h} + \frac{\gamma(i, j)}{h^2} \right]; \\ K4(i, j) &= \left[\frac{-\rho v_y(i, j)}{2h} + \frac{\gamma(i+1, j) - \gamma(i-1, j)}{4h^2} - \frac{\gamma(i, j)}{h^2} \right]; \\ K5(i, j) &= \left[\frac{-\rho v_x(i, j)}{2h} + \frac{\gamma(i, j-1) - \gamma(i, j+1)}{4h^2} - \frac{\gamma(i, j)}{h^2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для записи системы линейных уравнений, соответствующих системе (3), необходимо привести матрицу неизвестных значений функции $\mathbf{F}$ к одномерному массиву $\mathbf{Z}$. Заметим, что вектор неизвестных $\mathbf{Z}$ будет размером $(n-2) \times (m-2)$, а столбец свободных членов B – размером $(km - 2m - 2n + 4)$.

Вид каждого из уравнений системы (4) зависит от номера уравнения, т.е. от значений индексов (i, j) . Система линейных уравнений запишется в следующем виде:

1. $i = 2$;

а) $j = 2$; $Z(m-1)K2(2, 2) + Z(1) \cdot [K3(2, 2)K4(2, 2)] + Z(2)K5(2, 2) = B(1)$;

б) $j = l$ ($2 < l < m-1$);

$$Z(l-2)K1(2,l) + Z(n+l-3)K2(2,l) + Z(l-1) \cdot [K3(2,l) + K4(2,l)] + \\ + Z(l)K5(2,l) = B(l-1);$$

в) $j = m-1$;

$$Z(m-3)K1(2,m-1) + Z(m+n-4)K2(2,m-1) + \\ + Z(m-2)[K3(2,m-1) + K5(2,m-1)] = B(m-2);$$

2. $i = l$ ($2 < l < n-1$);

а) $j = 2$;

$$Z[n(l-1)-2l+3]K2(l,2) + Z[n(l-2)-2l+5]K3(l,2) + \\ + Z[n(l-3)+7-2l]K4(l,2) + Z[n(l-2)-2l+6]K5(l,2) = B[(m-2)+(l-2)];$$

б) $j = n$ ($2 < n < m-1$);

$$Z[n(l-2)-2l+n+2]K1(l,n) + Z[n(l-1)-2l+n+1]K2(l,n) + \\ + Z[n(l-2)-2l+n+3]K3(l,n) + Z[n(l-3)-2l+n+5]K4(l,n) + \\ + Z[n(l-2)-2l+n+4]K5(l,n) = B[(m-1)+l+n-2] = 0;$$

в) $j = m-1$;

$$Z[n(l-2)-2l+m+1]K1(l,m-1) + Z[n(l-1)-2l+m]K2(l,m-1) + \\ + Z[n(l-2)-2l+m+2]K3(l,m-1) + Z[n(l-3)-2l+m+4]K4(l,m-1) = \\ = B(nm-3m-3n+l+8);$$

3. $i = n-1$;

а) $j = 2$;

$$Z[n(n-3)-2n+7]K3(n-1,2) + Z[n(n-4)-2n+5]K4(n-1,2) + \\ + Z[n(n+3)-2n+8]K5(n-1,2) = B(n \cdot m - 3m - 2n + 7);$$

б) $j = l$ ($2 < l < m-1$);

$$Z[n(n-3)-2n+l+4]K1(n-1,l) + Z[n(n-3)-2n+l+5]K3(n-1,l) + \\ + Z[n(n-3)-3n+l+7]K4(n-1,l) + Z[n(n-3)-2n+l+6]K5(n-1,l) = \\ = B(nm-3m-2n+7+l-2);$$

в) $j = m-1$;

$$Z[n(n-3)-2n+m+3]K1(n-1,m-1) + \\ + Z[n(n-3)-2n+m+4][K3(n-1,m-1) + K5(n-1,m-1)] + \\ + Z[n(n-3)-3n+m+6]K4(n-1,m-1) + Z[n(l-3)-2l+m+4]K4(l,m-1) = \\ = B(n \cdot m - 2m - 2n + 4);$$

4. $B(1) = c_1 K_1(2,2)$; $B(l) = 0$; $l = 3, \dots, m-2$;

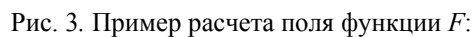
$$B(m-1) = -c_2 K_4(2,m-1); \quad B(m+l-2) = l_1 K_1(l,2); \quad l = 3, \dots, n-2;$$

$$B(m+l+n-3) = 0; \quad l = 3, \dots, n-2; \quad n = 3, \dots, m-2;$$

$$B(2m+l-2) = c_3 K_5(l,m-1); \quad l = 3, \dots, n-2;$$

$$B(mn-2m-2n+4) = -c_4 K 2(n-1, m-1).$$

a)



$5 - \frac{5}{8}R$; $6 - \frac{6}{8}R$; 6 – построение функции F в MathCAD

Таким образом, программа дает возможность определять поля функции F , физическим смыслом которой может быть температура, энтальпия, концентрация примеси.

Результаты расчетов показывают, что распределение поля по объему трубы соответствует физическому смыслу задачи: 1) значение характеристики поля тем больше, чем ближе к источнику; 2) с удалением от источника как по осевому сечению, так и по радиальному происходит снижение характеристики; 3) максимальное значение характеристики поля достигается в радиальном сечении, соответствующем крайней точке источника по осевой координате.

Приведенный и другие расчеты поля по описанному методу и алгоритму показывают хорошую их работоспособность, что позволяет использовать такой способ расчета и разработанный программный комплекс для математического моделирования и численных исследований распределения полей различной природы в ограниченном пространстве.

Список литературы

1. Бухмиров, В.В. Тепломассообмен / В.В. Бухмиров; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
2. Кузина, В.В. Математическое моделирование в задачах мониторинга состояния водной среды: моногр. / В.В. Кузина, А.Н. Кошев. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 144 с.
3. Головичев, В.И. Математическая модель движения воздуха в вентилируемом помещении / В.И. Головичев, В.И. Костин, С.А. Колесников // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – № 10. – С. 102–107.
4. Яненко, Н.Н. Численные решения упрощенных уравнений Навье – Стокса в приложении к анализу химически неравновесных и лазерных течений / Н.Н. Яненко, В.И. Головичев // Горение газов и натуральных топлив: сб. – Черногловка, 1980. – С. 86–93.

References

1. Bukhmirov, V.V. Heat and mass transfer / V.V. Bukhmirov; FGBOU HPE «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin» – Ivanovo, 2014. – 360 p.
2. Kuzina, V.V. Mathematical modeling in problems of monitoring the state of aquatic environment: monogr. / V.V. Kuzina, A.N. Koshev. – Penza: PGUAS, 2014. – 144 p.
3. Golovichev, V.I. Mathematical model of air movement in a ventilated room / V.I. Golovichev, V.I., Kostin S.A. Kolesnikov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Construction and Architecture. – 1982. – No. 10. – P. 102–107.
4. Yanenko, N.N. Numerical solutions of the simplified Navier-Stokes equations in the application to the analysis of chemically nonequilibrium and laser flows / N.N. Yanenko, V.I. Golovichev // Burning of gases and natural fuels: sat.. – Chernogolovka, 1980. – P. 86–93.

УДК: 697.95

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»

E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Аржаева Наталья Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогасоснабжение и
вентиляция»

E-mail: summer981@yandex.ru

Степанов Сергей Алексеевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»

E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Arzhaeva Natalia Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat, gas supply and
ventilation»

E-mail: summer981@yandex.ru

Stepanov Sergei Alekseevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Physics and chemistry»

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ПОДЗЕМНЫХ АВТОСТОЯНКАХ

Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, С.А. Степанов

Рассмотрены современные схемы организации противодымной вентиляции и способы дымоудаления на подземных автостоянках. Как вариант, рассматривается принцип совмещенной работы общеобменной и противодымной вентиляции, указываются достоинства и недостатки данной схемы. Альтернативным решением может служить использование системы струйной вентиляции. Рассматриваются режимы работы струйных вентиляторов, факторы применения струйной вентиляции, применяемое оборудование. Представлены результаты сравнительного анализа энергоэффективности традиционной и струйной систем вентиляции.

Ключевые слова: подземные автостоянки, организация дымоудаления противодымная вентиляция, струйная вентиляция, струйные вентиляторы

ORGANIZATION OF SMOKE PROTECTION VENTILATION SYSTEMS IN UNDERGROUND PARKING

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, S.A. Stepanov

Modern schemes of organization antismoke ventilation and smoke protection methods in underground parking are considered. As an option the principle of combined work of general and smoke protection ventilation is discussed, strengths and weaknesses of this schemes. An alternative solution can be the use of jet ventilation. Modes of jet fans, factors of application of jet ventilation used equipment are given. The results of a comparative analysis of energy efficiency of traditional and jet ventilation are presented.

Keywords: underground parking, organisation of smoke ventilation, smoke protection ventilation, jet ventilation, spray jet ventilation fans

На сегодняшний день стремление к более рациональному использованию застроенных городских площадей возрастает с каждым годом, и все чаще прибегают к таким методам, как плотная компоновка помещений, уменьшение высоты подземных парковок и подсобных помещений, размещение дополнительных коммерческих объектов. Однако это приводит к тому, что повышается пожарная опасность, поэтому становятся

приоритетными вопросы безопасности при авариях и пожарах на подземных парковках [1].

В связи с тем, что количество автомобилей возрастает, требуется все больше места для их хранения, и под территории парковок и стоянок выделяются значительные территории, что ведет за собой проектирование более разветвленных систем приточной, вытяжной вентиляции и систем дымоудаления автостоянок. В свою очередь, большие объемы воздуха, обусловленные требованиями пожарной безопасности и санитарными нормами эксплуатации парковок, приводят к увеличению диаметров этих систем и уменьшению высоты потолков. Поэтому при проектировании систем вентиляции и дымоудаления используют новые решения для подземных автостоянок.

Одним из таких решений является принцип совмещения вытяжных систем общеобменной и противодымной вентиляции.

Для реализации схемы этого типа необходимо предусмотреть установку нормально-открытых противопожарных клапанов (по одному в каждом поэтажном ответвлении вытяжных воздуховодов верхнего и нижнего уровней). Посредством таких клапанов может производиться подключение заборных отверстий канала верхнего уровня на горящем этаже (ярусе) и отключение всех остальных каналов.

Вентиляторы системы дымоудаления устанавливаются с регулируемыми параметрами (например, двухскоростные), на двигатели ставятся частотные преобразователи (ЧРП). Компании ВЕЗА, Климатвентмаш, SystemAir и другие выпускают вытяжные вентиляторы, у которых предусмотрена возможность работы только в режиме дымоудаления (ДУ) или в совмещенных режимах дымоудаления и вентиляции (ДУВ). В последнем случае вентиляторы комплектуются двигателями для длительной постоянной работы.

Расходы воздуха в ДУ-системах обычно значительно превышают расходы в вентиляционных системах (В) и требуют более мощных вентиляторов, что может быть реализовано применением многоскоростных установок. Например, в нормальном режиме В-система работает на стандартной скорости 100 %, но при пожаре переходит в ДУ-режим с повышенным расходом (до 150 %) скорости по настройке на ЧРП. Программирование ЧРП позволяет выбрать любое значение повышенной скорости в пределах разрешенного изготовителем значения. Компания ДАНФОСС поставляет ЧРП с встроенной программой управления ДУВ-вентилятором. Применение ЧРП-ДАНФОСС для ДУВ-вентиляторов позволяет получить «2 в 1», не переплачивая за дополнительный вентилятор и силовые линии питания с шкафами управления [2].

Расчетное определение требуемых параметров систем противодымной вентиляции или совмещенных с ними систем общеобменной вентиляции следует производить в соответствии с [3].

Типовая схема системы для помещений хранения автомобилей приведена на рис. 1.

Однако применение такой системы в реальном проектировании встречается крайне редко, и связано это с отсутствием более подробной информации о совмещении данных систем и опыта их эксплуатации.

Нередко проектировщики задают вопросы о возможности проектирования совмещенной общеобменной и противодымной вентиляции; данный вопрос также поднимался редакцией журнала «АВОК» [4].

Принцип совмещения системы общеобменной и противодымной вентиляции допускается современными нормативными документами. При реализации такой схемы будут высвобождаться площади, занимаемые вентиляционным оборудованием, уменьшится количество вентиляционных каналов, число отводов, что в итоге приведет к снижению напорных характеристик вентиляторов и уменьшению электрической мощности двигателей.

Другим современным и распространенным решением организации принудительной вентиляции и дымоудаления в крытых автостоянках и гаражах является использование системы струйной вентиляции.

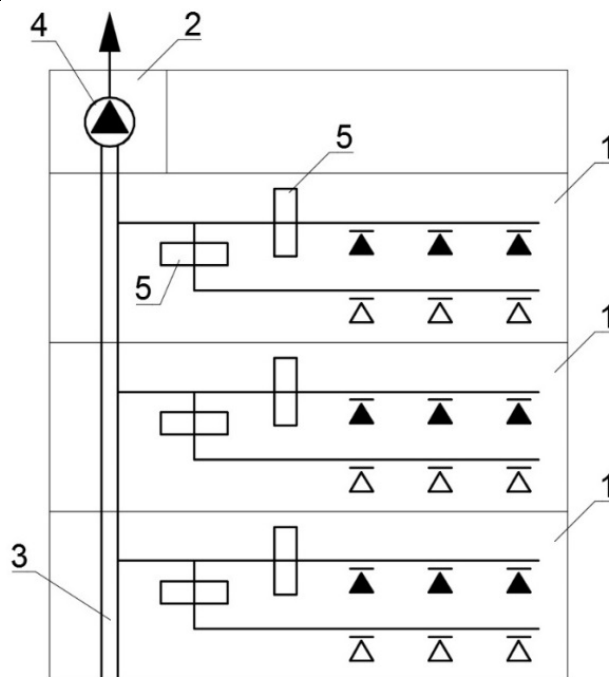


Рис. 1. Схема совмещенной вытяжной противодымной и общеобменной вентиляции в помещении хранения автомобилей:

- 1 – ярусы (этажи), помещения для хранения автомобилей; 2 – венткамера;
3 – шахта, вертикальный коллектор; 4 – вентилятор совмещенной системы/двухскоростной;
5 – противопожарные нормально-открытые клапаны

Принципиальное назначение струйных вентиляторов – создание направленного потока воздуха высокой скорости в загрязненной выхлопными газами зоне автостоянки (или зоне пожара), иными словами, они помогают переместить воздух от места притока к месту вытяжки [5].

Струйная вентиляция предназначена для работы в двух режимах:

- разбавление и удаление вредных примесей выхлопных газов при эксплуатации в штатном режиме (рис. 2, а);
- удаление продуктов горения при пожаре (рис. 2, б).

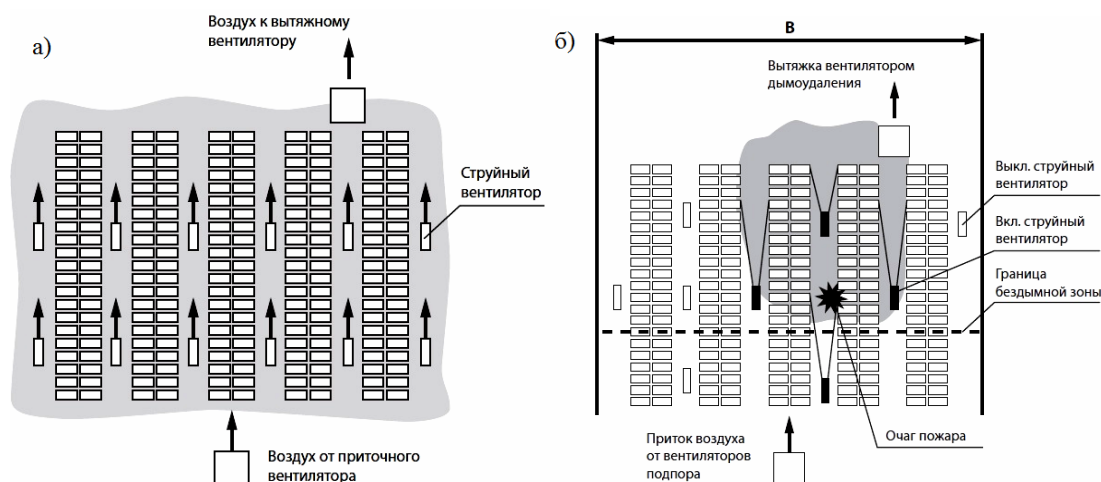


Рис. 2. Работа струйной вентиляции в штатном (а) и аварийном (б) режимах

В штатном режиме работы автостоянки струйная вентиляция должна обеспечить требуемый воздухообмен; учитывая, что вредные примеси относительно равномерно распределены по объему парковки, по сигналу датчиков загазованности по СО происходит одновременное включение всех струйных вентиляторов. В этом случае вентиля-

торы работают на 50 % от номинального расхода воздуха. При этом обеспечивается перемешивание всего объема воздуха в помещении автопарковки за счет эжекционного эффекта, когда струйный вентилятор вовлекает в движение объем воздуха, в 10...15 раз больший номинального расхода воздуха собственно вентилятора [1]. Также включена вытяжная и приточная системы вентиляции.

Наиболее ответственным является режим дымоудаления. Проектные решения по выбору вентиляционного оборудования и размещению струйных вентиляторов должны в полной мере защищать при пожаре, а расчетный воздухообмен принимают максимальным в режиме дымоудаления. На полную мощность включаются только вентиляторы, создающие «жидкий коллектор», обеспечивающий отвод продуктов сгорания от источника пожара. Остальные вентиляторы, а также вытяжная и приточная общеобменные системы выключены [1]. При таком режиме в работе должны находиться вентиляторы дымоудаления и подпора воздуха.

При возникновении пожара источник возгорания считается точечным, поэтому необходимо правильно расположить приток и вытяжку так, чтобы обеспечить перенос требуемого объема свежего воздуха, захватываемый струйными вентиляторами, для проветривания парковки или удаления продуктов горения при авариях. В этом случае необходимо стремиться к тому, чтобы свести к минимуму площадь задымления автостоянки и расстояние от очага возгорания до вытяжного вентилятора. Особенностью продольной струйной вентиляционной системы автостоянки является возможность реверса воздушного потока и изменение его скорости в зависимости от сценария пожара (рис. 3), что достигается за счет использования соответствующего вентиляционного оборудования, а именно:

- реверсивных струйных вентиляторов;
- реверсивных вентиляторов дымоудаления, способных работать с максимальной производительностью при 400 °С в течение 2 часов, а в реверсном режиме вентиляторы должны работать без потери КПД [6].

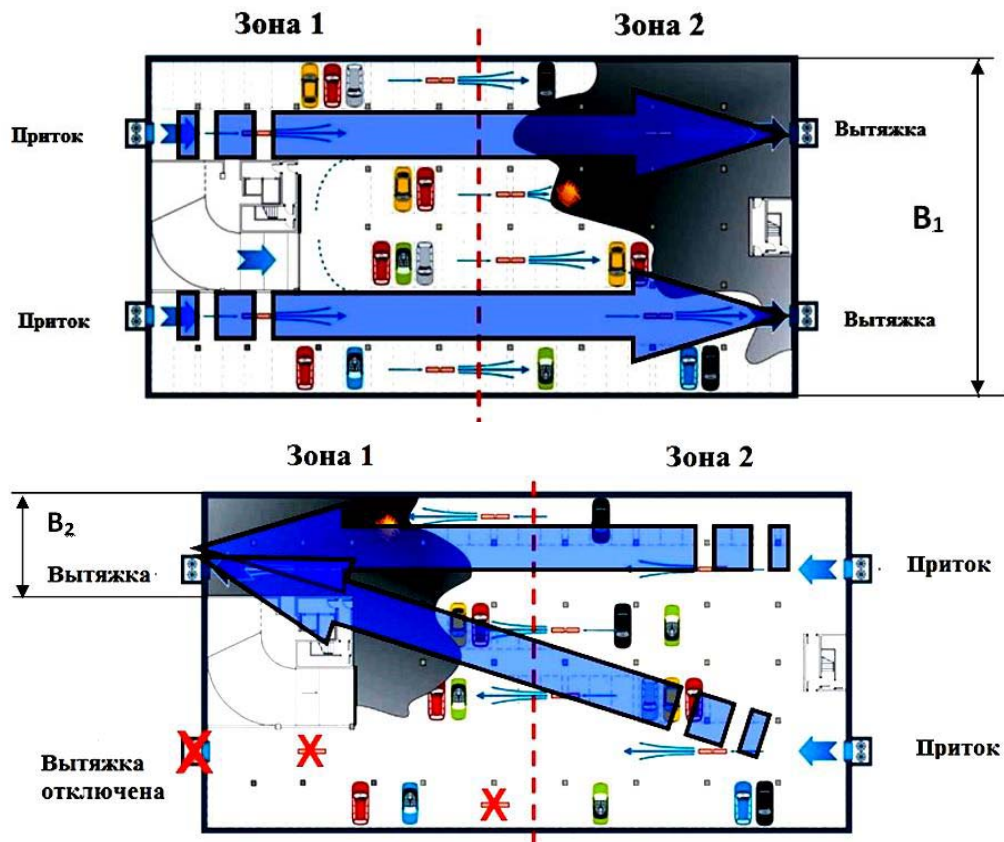


Рис. 3. Работа системы продольной струйной вентиляции с применением реверсивных вентиляторов

Также одним из главных факторов применения струйной вентиляции является правильное расположение струйных вентиляторов по площади автостоянки. Необходимо учитывать планировку помещения и его конструктивные особенности, а также рассчитать требуемую мощность и дальность действия вентиляторов, их количество и взаимное расположение в пространстве.

Основные преимущества струйных вентиляционных систем крытых автостоянок:

- отсутствие воздуховодов;
- повышение безопасности эксплуатации автопарковки за счет создания бездымных эвакуационных зон по высоте парковки (высота потолка парковки не является фактором риска);
- уменьшение высоты потолков и повышение эффективности использования подземного пространства (за счет более плотной компоновки);
- снижение первоначальных затрат;
- равномерное распределение воздуха (без мёртвых зон);
- уменьшение разогрева потолков и других элементов гаража при пожаре.
- улучшение видимости при пожаре.

Более сложные объемно-планировочные решения автостоянки могут стать причиной возникновения «застойных» зон при работе вентиляции и дымоудаления, однако эту проблему можно решить с помощью мультинаправленной системы индукционной вентиляции с применением вентиляторов TRIX [7]. Данные системы позволяют направлять поток воздуха в 4 направления одновременно, при этом контролируя несколько зон автостоянок со сложной конфигурацией. Распространение задымления в случае пожара можно свести к минимуму и эффективно удалить продукты горения через ближайший клапан дымоудаления (рис. 4).

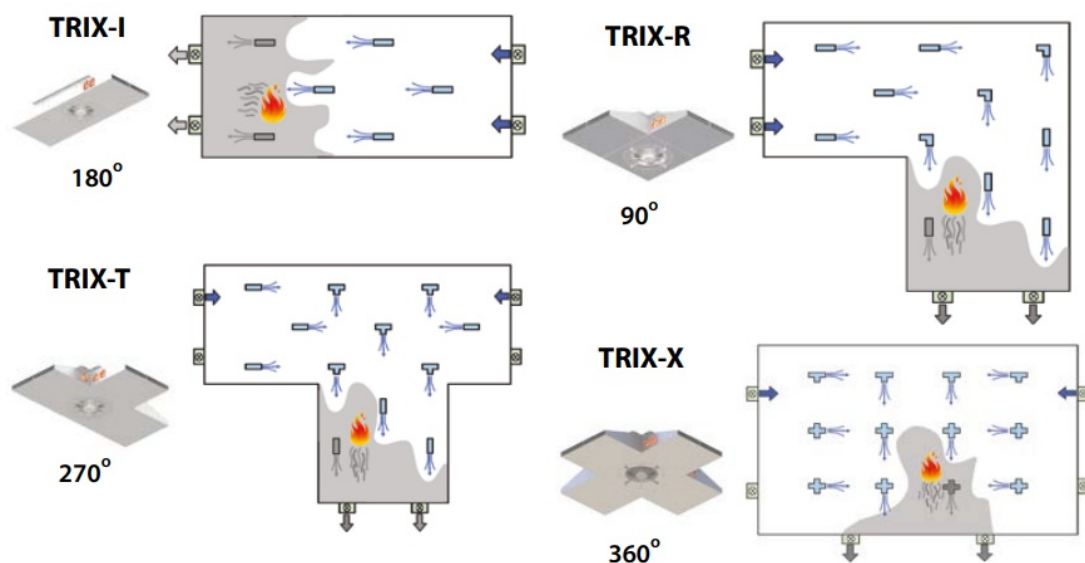


Рис. 4. Конфигурации вентиляторов TRIX

Методика расчета и подбора струйных вентиляторов приведена в [1, 8, 9]. Важным критерием работы струйной вентиляции является условие, при котором средняя скорость v_1 потока холодного воздуха от вентиляторов системы подпора должна быть больше или равна минимально допустимому значению скорости воздуха $V_{кр}$: $v_1 \geq V_{кр}$.

$$V_{кр} = \sqrt[3]{-\frac{L}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} + \frac{L^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{L}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} + \frac{L^3}{27}}} - \frac{D}{3}, \quad (1)$$

где L , M , D – коэффициенты, вычисляемые по [9, формула (6.9)].

Типоразмер струйного вентилятора подбирают исходя из значения реактивной тяги:

$$F_p = F_n k_1 k_2 k_3, \quad (2)$$

где F_n – величина номинальной реактивной тяги вентилятора, полученная при заводских стендовых испытаниях, Н; k_1 – коэффициент, учитывающий снижение реактивной тяги вентилятора от номинального значения, возникающее при передаче импульса от струи вследствие отличия средней скорости воздуха в парковке от нулевого значения, имевшего место при заводских испытаниях [9, формула (6.13)]; k_2 – коэффициент, учитывающий снижение реактивной тяги вентилятора от номинального значения вследствие эффекта трения от настилающейся на потолочное перекрытие вентиляционной струи [9, формула (6.14), рис. 6.6]; k_3 – коэффициент, учитывающий изменения реактивной тяги вентилятора от номинального значения вследствие снижения потерь на трение при отклонении вентиляционной струи от ограждений [9, рис. 6.7].

Расположение струйных вентиляторов определяется смыканием воздушных струй параллельных вентиляторов на расстоянии L_{Π} для создания равномерного (без разрывов) подпотолочного потока воздуха за счет подбора расстояния b между параллельно установленными вентиляторами. Эти параметры определяются графически по [9, рис. 6.9, 6.10]. А количество вентиляторов равно

$$n_b = \frac{A_{\text{ст}}}{S_{B1}}, \quad (3)$$

где S_{B1} – площадь, проветриваемая одним вентилятором, $S_{B1} = L_{\Pi} b$, м².

Компания Fläkt Woods представила результаты сравнительного анализа энергоэффективности традиционной и струйной систем вентиляции, отражающие режимы работы данных систем [10] (см. таблицу, рис. 4).

Сравнение энергоэффективности традиционной и струйной вентиляции

Режим работы вентиляции	Канальная система вентиляции, кВт·ч	Струйная система вентиляции, кВт·ч		
		Вентиляторы притока и вытяжки	Струйные вентиляторы	Суммарная нагрузка
Круглосуточная работа с перерывом на 7 часов ночью	189,6	121,9	40,8	162,7
Работа по таймеру	110,6	71,1	23,8	94,9
Работа по сигналу датчиков СО при постоянной работе приточной вентиляции	51,2	33,1	6,8	39,9
Работа по сигналу датчиков СО без постоянной работы приточной вентиляции	31,6	20,3	6,8	27,1

Рассмотрев принципы совмещения общеобменной и противодымной вентиляции, системы струйной и индукционной вентиляции, можно сделать вывод, что применение традиционных систем дымоудаления в крытых автостоянках уже не является рациональным, эффективным и экономичным решением. При этом наибольшее распространение получила система струйной вентиляции; в настоящее время она стала типовым техническим решением в странах Евросоюза, Японии, Южной Кореи и Китае.

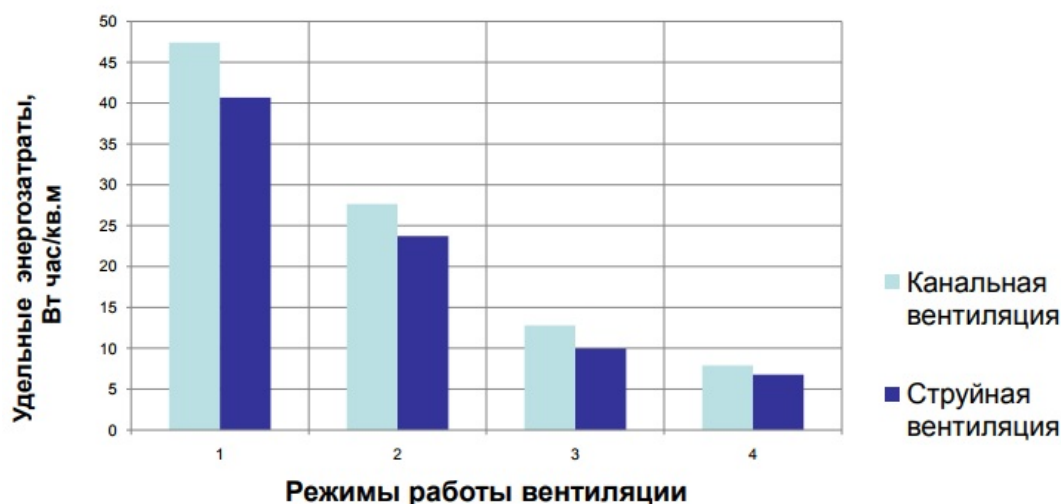


Рис. 5. Сравнение энергоэффективности традиционной и струйной вентиляции

Отказ от использования воздуховодов приточной, вытяжной вентиляции и системы дымоудаления в помещении парковки позволяет снизить затраты на оборудование и монтаж вентиляции примерно на 45 %. Снижаются энергозатраты на вентиляцию, обусловленные аэродинамическим сопротивлением воздуховодов и протечками воздуха. Исключаются ежегодные трудоемкие работы по очистке воздуховодов, характерные для канальной системы вентиляции, вследствие чего эксплуатационные затраты снижаются на 35...40 % [1].

При конструктивном совмещении общеобменной и противодымной систем вентиляции будут высвобождаться площади, занимаемые вентиляционным оборудованием, легче будет осуществлять прокладку вентиляционных каналов, что в итоге приведет к снижению напорных характеристик вентиляторов и уменьшению электрической мощности двигателей, к повышению энергоэффективности объекта.

Список литературы

1. Волков, А.П. Методика расчета вентиляционной системы парковки закрытого типа / А.П. Волков, А.М. Гримитлин, С.В. Рыков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – №2.
2. Вентиляторы ДУВ для двойного применения. – URL: <http://veza.by/wp-content/uploads/2017/05/ventilyatory-dvojnogo-primineniya.pdf>.
3. Рекомендации ФГУ ВНИИПО МЧС России. Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий: метод, рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2013.
4. Противодымная защита в вопросах и ответах. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5940.
5. Струйные осевые вентиляторы Systemair AJR, AJ8 для подземных автостоянок. – URL: <http://www.systemair-ukraine.com/jet-fan-aj8-ajr.html>.
6. Продольная реверсивная вентиляция крытых и подземных автостоянок. – URL: <http://www.flaktwoods.ru/about-us/media/news/prodolnaya-reversivnaya-ventilyaciya-krytyh-i-podzemnyh-avtostoyanok/>.
7. Решения для систем вентиляции. Вентиляция автостоянок. – URL: [http://flaktwoodsgroup.ru/sites/default/files/catalog/11_ventilyatory-i-ventilyacionnye-sistemy/axial_fans/Car_Parks_Sales%20Brochure_201410_\(RUS\).pdf](http://flaktwoodsgroup.ru/sites/default/files/catalog/11_ventilyatory-i-ventilyacionnye-sistemy/axial_fans/Car_Parks_Sales%20Brochure_201410_(RUS).pdf).
8. Проект СП «Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования». – М.: Минстрой, 2016.
9. СТО НОСТРОЙ 169. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. «Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок.

Правила проектирования и монтажа, контроль выполнения, требования к результатам работ» // НП «СЗ Центр АВОК».

10. Fläkt Woods. Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. – URL: https://climatexpo.ru/files/science/pdf/2015/2015_03_04_flakt_woods.pdf.

References

1. Volkov, A.P. Calculation method of ventilation system of closed type parking / A.P. Volkov, A.M. Gritlin, S.V. Rykov//Scientific journal ITMO. Series «Refrigeration and air-conditioning». – 2014. – No. 2.

2. Dual-use for DUV Fans. – URL: <http://veza.by/wp-content/uploads/2017/05/ventilyatory-dvojnogo-primeneniya.pdf>

3. The recommendations of the FGU VNIPO of Russia. Estimated determination of main parameters of smoke ventilation of buildings: Method. recommendations. – M.: VNIPO, 2013.

4. Antismoke protection: questions and answers. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5940.

5. Jet axial fans, AJR Systemair AJ8 for underground car parks. – URL: <http://www.systemair-ukraine.com/jet-fan-aj8-ajr.html>.

6. Longitudinal reversible ventilation of indoor and underground car parks. – URL: <http://www.flaktwoods.ru/about-us/media/news/prodolnaya-reversivnaya-ventilyaciya-krytyh-i-podzemnyh-avtostoyanok/>.

7. Solutions for ventilation systems. Ventilation of parking. – URL: [http://flaktwoodsgroup.ru/sites/default/files/catalog/11_ventilyatory-i-ventilyacionnye-sistemy/axial_fans/Car_Parks_-Sales%20Brochure_201410_\(ENG\).pdf](http://flaktwoodsgroup.ru/sites/default/files/catalog/11_ventilyatory-i-ventilyacionnye-sistemy/axial_fans/Car_Parks_-Sales%20Brochure_201410_(ENG).pdf).

8. Draft SP “Jet ventilation systems and smoke underground and indoor parking”. Design rules. – M.: Present, 2016.

9. STO NOSTROJ 169. Engineering of buildings and structures. Jet ventilation systems and smoke underground and indoor parking. Rules for designing and mounting, monitoring of implementation, requirements for the results of works» //NP «SZ Center AVOK”.

10. Fläkt Woods. Jet ventilation and smoke system of underground and indoor parking. – URL: https://climatexpo.ru/files/science/pdf/2015/2015_03_04_flakt_woods.pdf.

УДК: 614.842, 697.95

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

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Аржаева Наталья Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогасоснабжение и
вентиляция»
E-mail: summer981@yandex.ru

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: zigK@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

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Arzhaeva Natalia Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: summer981@yandex.ru

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

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ ЗОН

Т.И. Королева, Н.В.Аржаева, О.В. Тараканов

Рассмотрены особенности проектирования вентиляции пожаробезопасных зон, способы коллективной защиты людей от воздействия опасных факторов, в частности людей с ограниченными возможностями, при пожарах в зданиях высотой более 1 этажа. Приведены требования к проектированию приточной противодымной вентиляции пожаробезопасных зон. Рассмотрены варианты решения противодымной вентиляции: специальная и реверсивная приточная вентиляция. Приведены их сравнительные характеристики, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: пожаробезопасная зона, требования к пожаробезопасной зоне, маломобильные группы населения, противодымная приточная вентиляция, реверсивная вентиляция

DESIGN FEATURES OF FIREPROOF ZONES VENTILATION

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, O.V. Tarakanov

Peculiarities of designing of the ventilation of fireproof zones, methods for collective protection of people from hazards, in particular people with disabilities in fires in multy-story buildings are considered. Requirements for the design of the smoke ventilation inlet fireproof zones are described. Solutions to smoke ventilation: special ventilation and reversible discusses are discussed. Comparative characteristics, advantages and disadvantages are given.

Keywords: fireproof zone, requirements for flame zone, low mobile group of populations, antismoke blowing ventilation, reversible ventilation

В соответствии с требованиями п.2 ст.2 Федерального закона от 22.07.2008г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ФЗ-123) безопасной зоной является зона, в которой люди защищены от воздействия опасных факторов пожара (ОФП) или они отсутствуют. С учетом этого требования можно разделить безопасные зоны на два вида: безопасные зоны, расположенные вне объекта (улица, прилегающая к объекту территория) и безопасные зоны в составе объекта.

В соответствии с требованиями ст.5 ФЗ-123 на каждом объекте должна быть создана система обеспечения пожарной безопасности (СОПБ), целью создания

которой является предотвращение возникновения пожаров, обеспечение безопасности людей и защиты имущества при пожаре, включающая в себя: систему предотвращения пожара (СПП), систему противопожарной защиты (СППЗ) и комплекс организационно-технических мероприятий (КОПБ).

Системы коллективной защиты (СКЗ), являясь одной из составных частей СППЗ, в соответствии с требованиями ст.55 ФЗ-123 должны обеспечивать безопасность людей при пожаре в течение времени воздействия на них опасных факторов пожара (ОПФ).

К ОПФ, которые могут воздействовать на людей, относятся: пламя и искры, тепловой поток, повышенная температура окружающей среды, повышенная концентрация продуктов горения и термического разложения, пониженная концентрация кислорода, пониженная видимость в дыму.

Основным способом реализации системы коллективной защиты людей при пожаре на вышеуказанных объектах является устройство пожаробезопасных зон (ПБЗ). Они предназначены для людей с ограниченными возможностями – маломобильных групп населения.

Маломобильные группы населения (МГН) – люди, испытывающие затруднения при самостоятельном передвижении, получении услуги, необходимой информации, или при ориентировании в пространстве. К маломобильным группам населения здесь отнесены инвалиды, люди с временным нарушением здоровья, беременные женщины, люди преклонного возраста, люди с детскими колясками и т.п. В соответствии с таблицей В.1 СП 59.13330.2012 выделяется 4 группы мобильности М1, М2, М3 и М4 (рис. 1).

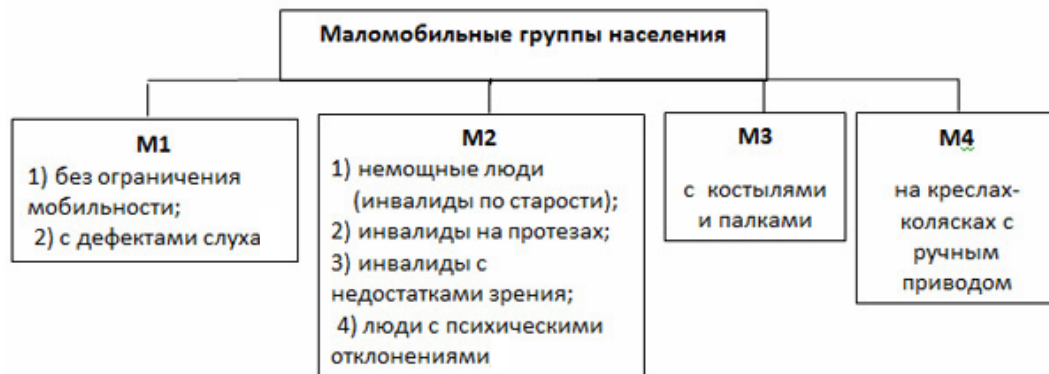


Рис. 1. Маломобильные группы населения

Необходимость проектирования ПБЗ следует определять на основании результатов сравнения фактического и необходимого времени эвакуации, учитывая при этом фактические геометрические и иные параметры путей эвакуации и эвакуационных выходов (протяженность, ширину, количество, конфигурацию и т.п.), а также с учетом возможности присутствия на объекте маломобильных групп населения. Указанные расчеты следует проводить в соответствии утвержденными в установленном порядке методиками, например ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования», приказами МЧС России от 30 июня 2009 №382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» и от 10 июля 2009 №404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».

Площадь пожаробезопасной зоны должна быть предусмотрена для всех инвалидов, остающихся по расчету на этаже, исходя из удельной площади, приходящейся на одного спасаемого, при возможности его маневрирования, а именно:

- инвалид в кресле-коляске – 2,40 м²/чел.;
- инвалид в кресле-коляске с сопровождающим лицом – 2,65 м²/чел.;
- инвалид, перемещающийся самостоятельно – 0,75 м²/чел.;
- инвалид, перемещающийся с сопровождающим лицом – 1 м²/чел.

Безопасные зоны следует предусматривать в отдельных помещениях с выходами непосредственно на незадымляемую лестничную клетку; на расстоянии не более 15 м от незадымляемых лестничных клеток, лифтов для инвалидов; в холлах лифтов для МГН, в холлах лифтов для транспортирования пожарных подразделений; на площадках лестничных клеток, служащих путем эвакуации, при этом размеры площадок лестничной клетки необходимо увеличивать исходя из размеров проектируемой зоны.

Помещение безопасной зоны должно отделяться от других помещений и коридоров противопожарными стенами 2-го типа (перегородками 1-го типа), перекрытиями 3-го типа с заполнением проемов (двери, окна) не ниже 2-го типа. Ограждающие конструкции ПБЗ должны быть выполнены из материалов класса конструктивной пожарной опасности КО, их внутренняя отделка – из негорючих материалов.

ПБЗ должны быть оборудованы устройствами связи с пожарным постом (диспетчерской, постом охраны или иным подобным помещением), которые следует устанавливать у выходов на лестничные клетки, в коридорах на расстоянии не более 20 м друг от друга, а также внутри самих пожаробезопасных зон. Линии связи указанных устройств следует предусматривать огнестойкими не менее времени, равного пределу огнестойкости несущих конструкций ПБЗ.

Помещения ПБЗ должны быть незадымляемыми.

В соответствии с положениями п. 7.15 «г» СП 7.13130 подача воздуха в помещения безопасных зон должна осуществляться из расчета необходимости обеспечения скорости истечения воздуха через одну открытую дверь защищаемого помещения не менее 1,5 м/с. При этом количество одновременно открытых дверных проемов в безопасной зоне, учитываемых в расчете параметров систем приточной противодымной вентиляции, принимается с учетом конкретных объемно-планировочных решений объекта и определяется индивидуально в каждом отдельном случае. Одновременно необходимо обеспечение избыточного давления в помещении безопасной зоны в пределах от 20 до 150 Па при всех закрытых дверях. В общем виде (независимо от расположения в лифтовом холле, незадымляемой лестничной клетке и пр.) примеры защиты безопасных зон приточно-вытяжной противодымной вентиляцией приведены на рис. 2–4.

В целях обеспечения противодымной защиты безопасной зоны для маломобильных групп населения (МГН) при обнаружении пожара системой автоматической пожарной сигнализации (АПС) подлежат включению ВД1, ПД 1, ПД 2, ПД 3, К 3.1; открытию КД 1.1, КП 1.1, КП 2.1. По управляющему сигналу от концевого выключателя КВ, фиксирующему открытие-закрытие двери ДПД, подлежит отключению (при закрытии ДПД) и включению (при открытии ДПД) вентилятор системы ПД 2. При выключенном вентиляторе системы ПД 2 противопожарный нормально открытый клапан сохраняет открытое положение, при этом рециркуляция внутреннего воздуха исключается клапаном КВО. Приточный воздух в безопасной зоне при закрытых дверях нагревается до требуемого значения температуры.

В целях обеспечения противодымной защиты безопасной зоны для маломобильных групп населения (МГН) при обнаружении пожара системой автоматической пожарной сигнализации (АПС) подлежат включению ВД1, ПД 1, ПД 2, ПД 3, К 3.1; открытию КД 1.1, КП 1.1, КП 2.1. По управляющему сигналу от датчика избыточного давления dP , контролирующему избыточное давление в безопасной зоне в диапазоне значений от 20 Па до 150 Па, подлежит отключению (при увеличении давления до 150 Па и более) и включению (при снижении давления до 20 Па и менее) вентилятор системы ПД 2. При выключенном вентиляторе системы ПД 2 противопожарный нормально открытый клапан сохраняет открытое положение, при этом рециркуляция внутреннего воздуха исключается клапаном КВО. Приточный воздух в безопасной зоне при закрытых дверях нагревается до требуемого значения температуры.

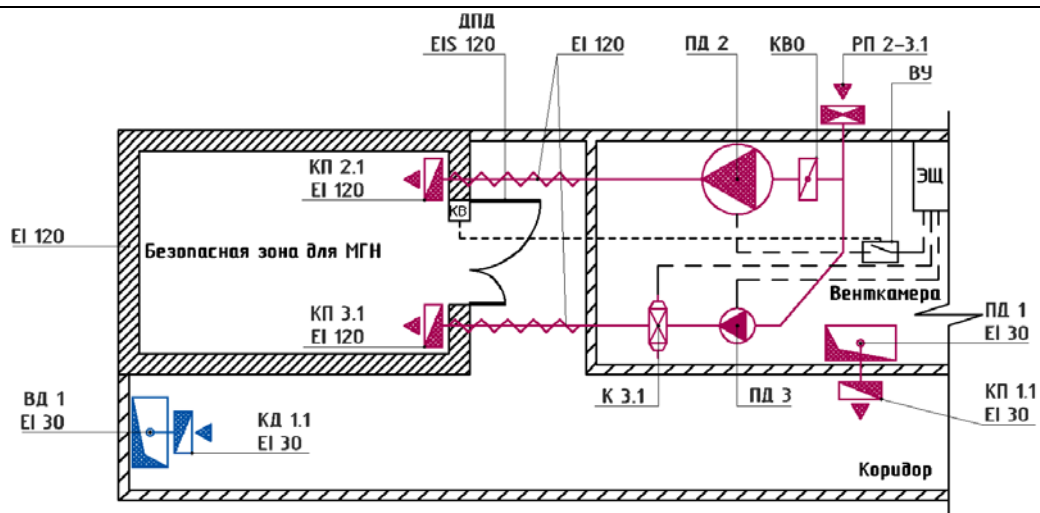


Рис. 2. Пример № 1 защиты безопасной зоны с применением концевого выключателя (КВ)

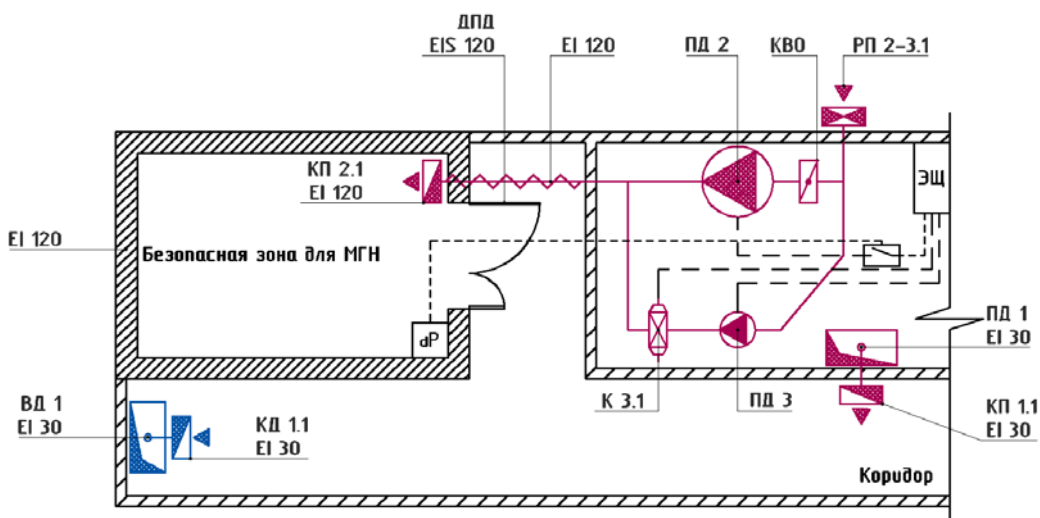


Рис. 3. Пример № 2 защиты безопасной зоны с применением датчика избыточного давления (dP)

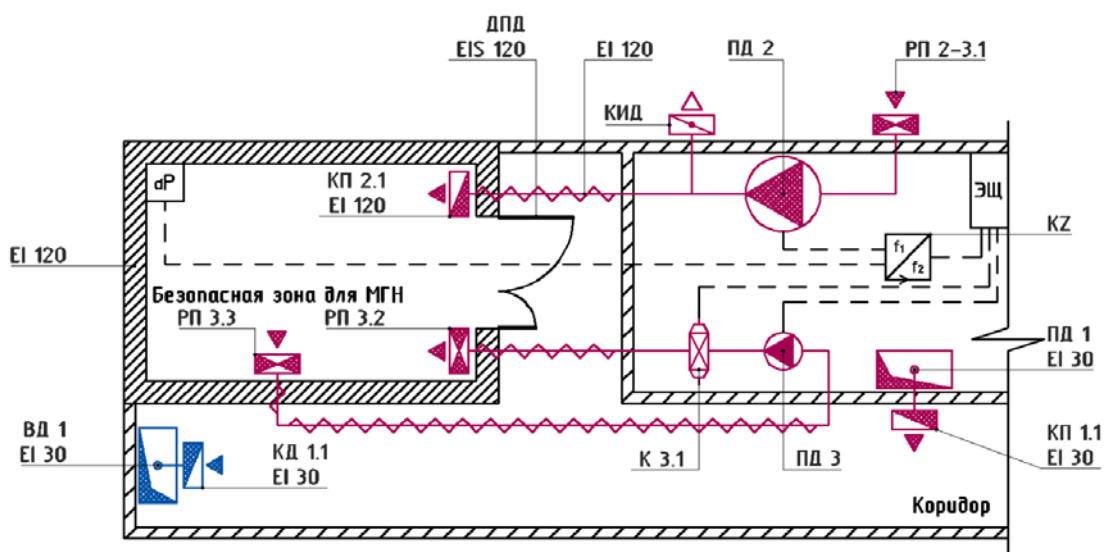


Рис. 4. Пример № 3 защиты безопасной зоны с применением датчика избыточного давления (dP) и инвертора (KZ)

В целях обеспечения противодымной защиты безопасной зоны для маломобильных групп населения (МГН) при обнаружении пожара системой автоматической пожарной сигнализации (АПС) подлежат включению ВД1, ПД 1, ПД 2, ПД 3, К 3.1; открытию КД 1.1, КП 1.1, КП 2.1. По управляющему сигналу от датчика избыточного давления dP , контролирующему избыточное давление в безопасной зоне в диапазоне значений от 20 Па до 150 Па, подлежит снижению (при увеличении давления до 150 Па и более) и увеличению (при снижении давления до 20 Па и менее) частота вращения рабочего колеса вентилятора системы ПД 2, в цепи электроснабжения которого подлежит установке инвертор КЗ. Остановка вентилятора ПД 2 не производится, при закрытых дверях безопасной зоны частота вращения рабочего колеса ПД 2 снижается до минимальных рабочих значений, избыточное давление в безопасной зоне в требуемом диапазоне значений осуществляется клапаном КИД. Внутренний рециркулируемый воздух в безопасной зоне при закрытых дверях нагревается до требуемого значения температуры.

Во всех описанных выше примерах:

- не допускается установка КИД в ограждающих строительных конструкциях безопасной зоны;
- в обязательном порядке на этаже с очагом пожара подлежат включению системы ВД 1, ПД 1.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	– шахта системы вытяжной противодымной вентиляции;
	– клапан дымоходный (КД);
	– шахта системы приточной противодымной вентиляции;
	– вентилятор системы приточной противодымной вентиляции (ВПД);
	– воздуховод в огнестойком исполнении;
	– противопожарный клапан (КП);
	– решетка воздухоприточная (РП);
	– электрический калорифер (К);
	– клапан вентиляционный обратный (КВО);
	– клапан избыточного давления (КИД);
	– электрический щит (ЭЩ);
	– управляющий выключатель (ВУ);
	– концевой выключатель (КВ);
	– датчик избыточного давления (Р);
	– инвертор (КЗ).

Рис. 5. Условные обозначения к примерам на рис. 2–4

Требования к пожаробезопасным зонам представляются вполне логичными и обоснованными. Однако необходимо отметить, что применение ПБЗ в составе объекта имеет свои положительные и отрицательные стороны. Положительным моментом является тот факт, что применение ПБЗ позволяет проектировать объекты с большой

протяженностью путей эвакуации. В числе отрицательных факторов применения ПБЗ можно отметить значительную площадь подобных зон (собственник объекта не получает от них никакой экономической отдачи), а также необходимость применения приточной противодымной вентиляции.

В целом система, предназначенная для подачи приточного воздуха во время пожара, должна рассчитываться исходя из следующих соображений (характер которых тем более обязательный, чем больше площадь обслуживаемых помещений):

- приточный воздух, естественно, чистый, должен в полном объеме поступать в здание только снаружи. Соответственно, точки воздухозабора должны располагаться на достаточном удалении от точек выброса дымовых газов;
- приточный воздух должен подаваться на малой скорости (примерно 1 м/с) и равномерно распределяться по всей площади помещений;
- приточный воздух должен поступать в помещение не сверху, а на уровне ниже вероятной границы слоя дыма;
- в целях обеспечения надежности системы станция обработки приточного воздуха должна проходить процедуру периодического технического осмотра и обслуживания;
- система должна быть полностью регулируемой (речь идет о пропускных объемах и параметрах подаваемого воздуха), при этом в любом случае объем приточного сменного воздуха (об./ч) должен быть меньше, чем объем отводимого дыма;
- автор проекта должен обязательно учитывать возможные произвольные последствия воздействия на систему внешних факторов, в частности, поступления свежего воздуха на участок, охваченный пожаром;
- в целом система должна оставаться достаточно простой в конструктивном и эксплуатационном отношении, чтобы минимизировать возможность ошибки со стороны обслуживающего персонала, вызванной непониманием каких-либо моментов.

В соответствии с подпунктом г) пункта 7.15 СП 7.13130.2013 в помещения безопасных зон необходимо подавать воздух «из расчета необходимости обеспечения скорости истечения воздуха через одну открытую дверь защищаемого помещения не менее 1,5 м/с». И в соответствии с подпунктом е) пункта 7.17 СП 7.13130.2013 следует предусматривать «подогрев воздуха, подаваемого в помещения безопасных зон».

Для системы, находящейся в режиме дежурного ожидания, использовать водяной воздухонагреватель с дорогостоящей автоматикой защиты от размораживания экономически нецелесообразно. При открытой двери безопасной зоны (кратковременный режим во время пожара) требуемая мощность электроподогревателя значительно превышает 100 кВт. Поэтому современная практика проектирования свелась к обеспечению электроподогрева воздуха при закрытой двери, когда расход с учетом утечек через закрытую дверь снижается примерно в 20 раз. Соответствующее уточнение подпункта е) пункта 7.17 СП 7.13130.2013 содержится в подготовленном изм. 1 этого СП.

Таким образом, двухканальная система подачи воздуха в безопасную зону должна управляться в зависимости от положения двери в этой зоне. По зарубежным данным, осуществлять управление такой системой лучше всего по сигналам, поступающим от датчика перепада давления.

Все множество имеющихся технических решений можно, по сути, свести к двум основным видам:

- станция воздухообработки, специально выделенная для работы только в нештатной ситуации (при пожаре);
- станция воздухообработки реверсивного типа.

В первом случае станция воздухообработки включается только в случае возникновения пожара, и приточный воздух подается и распределяется в помещении исключительно с целью обеспечения безопасности. Естественно, такая система наиболее полно отвечает требованиям пожаробезопасности.

Метод применения отдельной системы воздухообработки в целях отвода продуктов горения имеет следующие преимущества:

- размещение и скорость приточного воздуха легко регулируются, как отмечено в п. 1, 2 и 3 выше;

- ручной привод можно легко вывести на пульт пожарной сигнализации;
- весь приточный воздух можно обрабатывать согласно расчетным условиям (нагревать, охлаждать, фильтровать) и регулировать в достаточно широком диапазоне;
- все устройства регулировки и управления в меньшей степени подвержены случайным поломкам со стороны того же персонала, поскольку применяются только в экстренных нештатных ситуациях.

Вместе с тем будет справедливо отметить и определенные недостатки, а именно:

- рост непроизводительной затратной части, поскольку оборудование предназначено для работы только в экстренных ситуациях;
- повышенный риск неожиданных сбоев из-за того, что оборудование используется крайне редко.

В качестве альтернативного решения могут применяться системы реверсивного типа. Но в этом случае оборудование работает непрерывно, прежде всего в штатном стандартном режиме в качестве системы кондиционирования воздуха, а в экстренных ситуациях – как система подпора воздуха путем подачи приточного воздуха. В рамках аварийных ситуаций регулировочные клапаны устанавливаются в положение, когда через станцию начинает идти только наружный воздух, и полностью исключается его подмешивание к возвратному воздуху. Если система относится к регулируемому типу (VAV – Variable Air Volume, система с переменным расходом воздуха), при возникновении пожара регулирующие клапаны полностью открываются, независимо от показания температурных датчиков. Кроме того, требуется обеспечить дополнительный приток воздуха, в том числе через возвратные воздушные каналы.

Преимущества метода:

- в отличие от специальных систем, размещение и скорость приточного воздуха здесь также регулируются, но сама система существенно усложняется за счет двойного назначения;
- надежность системы существенно выше, поскольку любой дефект выявляется и своевременно устраняется в рамках ежедневной штатной работы;
- ручной привод также можно легко вывести на пульт пожарной сигнализации;
- весь приточный воздух можно обрабатывать согласно расчетным условиям (нагревать, охлаждать, фильтровать) и регулировать в желаемом диапазоне.

Среди недостатков необходимо отметить:

- система более сложная, отсюда необходимость специальной подготовки обслуживающего персонала;
- все составные части системы помимо работы в штатном режиме должны обеспечивать бесперебойное функционирование, в том числе в аварийной ситуации ликвидации пожара на объекте.

Это ведет к тому, что такие компоненты и узлы проектируются с большим запасом на прочность и т. п. и имеют чаще всего более высокую стоимость, что неизбежно удорожает всю систему.

Окончательное слово в применении ПБЗ остается за разработчиком проектной документации. Именно он должен найти компромисс между требованиями пожарной безопасности и интересами застройщика объекта, а это, в свою очередь, повышает требования к самому разработчику.

В любом случае все предусматриваемые противопожарные мероприятия в части проектирования пожаробезопасных зон подлежат соответствующему обоснованию при разработке проектной документации по объекту. Соответствие проектных решений и характеристик пожаробезопасных зон требованиям пожарной безопасности следует обосновывать ссылками на положения Федерального закона от 30.12.2009 г. №384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и Федерального закона от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», ссылками на требования нормативных документов по пожарной безопасности, а также одним или несколькими из следующих способов: результатами исследований, расчетов и (или) испытаний, выполненных по сертифицированным или апробированным иным способом методикам, моделированием сценариев возникно-

вения и распространения пожара и его опасных факторов, оценкой величины пожарного риска.

Список литературы

1. Федеральный закон РФ от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. СП 59.13330.2016 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» (актуализированная редакция СНиП 35-01-2001). – М.: Минстрой, 2016.
3. СП 7.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Противопожарные требования». – М.: Минстрой, 2013.
4. Рекомендации по проектированию в общественных зданиях безопасных зон для маломобильных групп населения: метод. пособие / СРО «МОАБ». – М., 2016.
5. Приказ МЧС России от 30.06.2009 N 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (зарегистрировано в Минюсте России 06.08.2009 № 14486).

References

1. Federal law of the Russian Federation dated July 22, 2008, №. 123-FZ “Technical regulations on fire safety requirements”.
2. SP 59.13330.2016. Accessibility of buildings and structures for the city populations (Updated Edition of SNIP 35-01-2001). – M.: Minstroy, 2016.
3. SP 7.13130.2013 Fire protection systems. Heating, ventilation and air conditioning. Fire protection requirements. – M.: Minstroy, 2013.
4. Recommendations for the design of public buildings safe zones for limited mobility people: method. manual / SRO «MOAB». – M., 2016
5. Order of the Ministry of Emergency situations of Russia from 30.06.2009 N 382 «on approval of the methodology for determining settlement values of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger» (registered with the Ministry of Justice of Russia 06.08.2009 № 14486).

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

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Князев Владимир Александрович,
аспирант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

*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

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building constructions»

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Postgraduate of the department «Water
supply, sewerage and hydraulic engineering»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ИСТОЩЕНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ПРОЦЕССЕ МАССОПЕРЕДАЧИ В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЖИДКОСТЬ – ГАЗ

С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований процессов массопередачи газа из газовой в жидкую фазу. Показано, что в процессе расчета аэрационного оборудования, размещенного в бассейне, имеющем большую глубину, пренебрежение эффектом концентрации диффундирующего газа во всплывающем пузырьке газа может привести к значительной погрешности. Движущей силой процесса массопередачи диффундирующего компонента через границу раздела фаз является разность концентрации насыщения жидкости газом и текущей концентрации газа в жидкости. Поскольку концентрация насыщения жидкости газом зависит от концентрации диффундирующего газа в газовой фазе, уменьшение ее величины обуславливает снижение интенсивности процесса массопередачи. Учесть эффект снижения концентрации диффундирующего газа позволит коэффициент истощения газовой фазы. Определить величину коэффициента истощения газовой фазы можно, учитывая баланс масс сорбируемого газа в газовой и жидкой фазах. На основе анализа баланса масс получено уравнение, с помощью которого можно определять величину коэффициента истощения газовой фазы. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать параметры очистки сточных вод методом барботирования.

Ключевые слова: двухфазовая система, система жидкость – газ, процесс массопередачи, коэффициент распределения, коэффициент истощения, концентрация насыщения, коэффициент абсорбции

ESTIMATION OF EFFECT OF GAS PHASE DEPLETION IN MASS TRANSFER PROCESSES IN THE TWO-PHASE LIQUID-GAS SYSTEMS

S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, N.N. Laskov, V.A. Knyazev

Results of theoretical researches of processes of gas mass transfer from gas phase to fluid phase are given. It is shown, when calculating the aeration equipment placed in a deep pool, neglect of effect of diffusing gas concentration in a floating gas bubble can lead to a significant error. The difference of saturated gas concentration in liquid and current gas concentration in liquid is a motive force of mass transfer process of diffusing component through phase boundary. As saturated gas concentration in liquid depends on diffusing gas concentration in gas phase, reduction of its value causes decrease in intensity of mass transfer process. The gas phase depletion coefficient allows to consider effect of reduction of diffusing gas concentration. It is possible to determine a value of the gas phase depletion coefficient, considering mass balance of sorbing gas in gas phase and fluid phase. The equation allowing to determine a value of the gas phase depletion coefficient is obtained on the basis of the mass balance analysis. Use of the proposed calculation method allows to optimize parameters of waste water treatment by the barbotage method.

Keywords: two-phase system, liquid-gas system, mass transfer process, distribution coefficient, depletion coefficient, saturation concentration, absorption coefficient

В технологических процессах очистки сточных вод широкое распространение получили динамические двухфазовые системы жидкость – газ.

В рассматриваемых двухфазовых системах сплошной средой (дисперсной средой) является жидкость, в которой распределены пузырьки, являющиеся дисперсной фазой (диспергированной газовой фазой) [1].

Как правило, диспергированная газовая фаза (ДГФ) в технологиях очистки сточных вод получается барботажным способом, при котором диспергируемый газ проходит через поры (отверстия) воздухораспределительного устройства, погруженного в жидкость, в результате чего образуется поток газовых пузырьков.

В качестве газовой фазы выступает воздух, в качестве жидкой фазы – очищаемые сточные воды.

Плотность воздуха на несколько порядков меньше плотности воды, вследствие чего на образовавшиеся пузырьки действует сила Архимеда, выталкивающая их из воды. Пузырьки воздуха всплывают на поверхность воды, где в случае отсутствия поверхностно-активных веществ происходит их схлопывание. Поверхность пузырьков воздуха, всплывающих в воде, называется динамической поверхностью. Открытая поверхность воды, на которой происходит схлопывание пузырьков воздуха, называется инверсионной поверхностью. Динамическая двухфазовая система вода – воздух может существовать лишь в процессе подачи сжатого воздуха в воздухораспределительное устройство. Прекращение подачи воздуха, т.е. отсутствие расхода легкой фазы, приведет к превращению двухфазовой динамической системы в однофазную через малый промежуток времени, который равен продолжительности всплывания пузырька воздуха через слой воды.

Продолжительность всплывания пузырька воздуха $\Delta T_{\text{п}}$ характеризует продолжительность контакта газовой и жидкой фаз [3].

В первом приближении в качестве простейшей модели двухфазной системы «жидкость – газ» можно принять одиночный пузырек воздуха, имеющий строго сферическую форму и диаметр $d_{\text{п}}$ (м) и свободно всплывающий через слой воды H (м) со скоростью $v_{\text{п}}$ (м/с) (рис. 1).

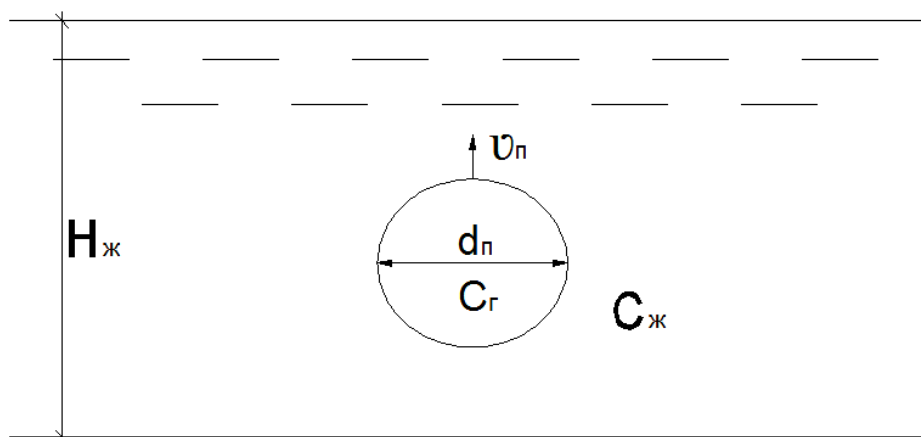


Рис. 1. Модель двухфазной системы «жидкость – газ»

Время контакта $\Delta T_{\text{п}}$ (с) газовой и жидкой фаз в этом случае можно определить как

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{H_{\text{ж}}}{v_{\text{п}}} . \quad (1)$$

За время свободного всплывания пузырька воздуха $\Delta T_{\text{п}}$ через поверхность раздела фаз воздух – вода (динамическую поверхность) будет происходить диффузия компонентов газовой фазы из воздуха в воду или из воды в воздух.

Примером перехода компонента газовой фазы в жидкость является процесс насыщения воды кислородом воздуха при ее аэрации.

В процессе отдувки растворенного аммиака из сточных вод сжатым воздухом происходит переход растворенного газа из жидкости в воздух.

Процесс массопередачи через динамическую поверхность прекратится при достижении динамического равновесия.

Условием динамического равновесия при постоянстве температуры и давления будет равенство химических потенциалов диффундирующего компонента в жидкой и газовой фазах [3]

$$\mu_{\text{ж}} = \mu_{\text{г}} . \quad (2)$$

Условие динамического равновесия (2) также можно записать в виде

$$\mu_{\text{ж}}^0 + RT \ln a_{\text{ж}} = \mu_{\text{г}}^0 + RT \ln a_{\text{г}} , \quad (3)$$

где $a_{\text{ж}}$ и $a_{\text{г}}$ – активности диффундирующего компонента в жидкой газовой фазе.

Откуда

$$\ln \frac{a_{\text{ж}}}{a_{\text{г}}} = \frac{\mu_{\text{г}}^0 - \mu_{\text{ж}}^0}{RT} . \quad (4)$$

Так как стандартные химические потенциалы $\mu_{\text{ж}}^0$ и $\mu_{\text{г}}^0$ постоянны, то постоянно и отношение активностей третьего компонента (аммиака) в газовой и жидкой фазах:

$$K_0 = \frac{a_{\text{ж}}}{a_{\text{г}}} = \text{const} . \quad (5)$$

K_0 называется термодинамической константой распределения.

Величина термодинамической константы распределения зависит от температуры и природы веществ, образующих равновесную систему.

Величина активностей распределяемого вещества в жидкой $a_{\text{ж}}$ и газовой $a_{\text{г}}$ фазах связана с концентрациями распределяемого вещества в этих фазах $C_{\text{ж}}$ и $C_{\text{г}}$ соотношениями

$$a_{\text{ж}} = \gamma_{\text{ж}} \cdot C_{\text{ж}}, \quad (6)$$

$$a_{\text{г}} = \gamma_{\text{г}} \cdot C_{\text{г}}, \quad (7)$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ и $\gamma_{\text{г}}$ – коэффициенты активности распределяемого вещества в жидкой и газообразной фазах, которые формально учитывают все виды взаимодействий молекул распределяемого вещества, приводящие к отклонению от свойств идеального раствора.

С учетом (6) и (7), (5) можно записать в виде

$$K_0 = \frac{a_{\text{ж}}}{a_{\text{г}}} = \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{г}}} \cdot \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{г}}} = K_{\text{р}} \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{г}}}, \quad (8)$$

$$K_{\text{р}} = \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{г}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{р}}$ – коэффициент распределения, определяемый как отношение равновесных концентраций распределяемого компонента в жидкой и газовой фазах.

Коэффициент распределения $K_{\text{р}}$ в отличие от термодинамической константы распределения K_0 зависит не только от температуры и природы компонентов системы, но и от ионной силы раствора распределяемого вещества.

Величина растворимости диффундирующего компонента в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м³) зависит от температуры раствора t (°C) и связана с величиной коэффициента абсорбции Бунзена α (м³/м³) соотношением [3]

$$C_{\text{н}} = \alpha \cdot \rho, \quad (10)$$

где ρ (кг/м³) – плотность диффундирующего компонента при температуре t (°C).

Коэффициент абсорбции Бунзена α характеризует величину объема газа, поглощенного единицей объема жидкости при температуре t (°C) и стандартном парциальном давлении.

В табл. 1 приведены значения растворимости кислорода воздуха в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м³), концентрации кислорода в воздухе $C_{\text{кв}}$ (кг/м³) и величины коэффициента абсорбции Бунзена α (м³/м³) при разных температурах t (°C).

Т а б л и ц а 1

Температура раствора t (°C)	10	20	30	40	50
Растворимость кислорода воздуха в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м ³)	0,0113	0,0090	0,0074	0,0065	0,0056
Концентрация кислорода в воздухе $C_{\text{кв}}$ (кг/м ³)	0,288	0,278	0,269	0,261	0,252
Коэффициент абсорбции Бунзена α (м ³ /м ³)	0,039	0,032	0,028	0,025	0,022

В табл. 2 приведены значения растворимости аммиака в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м³), плотности газа аммиака $\rho_{\text{а}}$ (кг/м³) и величины коэффициента абсорбции Бунзена α (м³/м³) при разных температурах t (°C).

Т а б л и ц а 2

Значения растворимости аммиака в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м³), плотности газа аммиака $\rho_{\text{а}}$ (кг/м³) и величины коэффициента абсорбции Бунзена α (м³/м³) при разных температурах t (°C)

Температура раствора t (°C)	10	20	30	40	50
Растворимость аммиака в воде $C_{\text{н}}$ (кг/м ³)	679	520	403	307	229
Плотность газа аммиак $\rho_{\text{а}}$ (кг/м ³)	0,74	0,72	0,69	0,67	0,65
Коэффициент абсорбции Бунзена α (м ³ /м ³)	917	731	584	458	352

Движущей силой процесса массопередачи диффундирующего компонента через границу раздела фаз «жидкость – газ» является разность концентраций насыщения воды газом C_n и текущей концентрации газа в жидкости C :

$$\Delta C = C_n - C. \quad (11)$$

Концентрация насыщения жидкости газом C_n (кг/м³) зависит от концентрации газа в пропускаемом через жидкость воздухе $C_{гв}$ (кг/м³) и значения коэффициента абсорбции Бунзена α (м³/м³).

$$C_n = C_{гв} \cdot \alpha. \quad (12)$$

В случае если разность концентрации насыщения жидкости газом C_n и текущей концентрации газа в жидкости C является положительной величиной, то имеет место процесс сорбционного перехода газа из воздуха в жидкость; если эта разность является отрицательной величиной, то наблюдается процесс десорбции – перехода газа из воды в воздух.

Скорость процесса массопередачи газа $\frac{dm}{dt}$ (кг/с) при барботировании прямо пропорциональна величине движущей силы процесса ΔC (кг/м³), площади раздела фаз «воздух – жидкость» A (м²) и величине поверхностного коэффициента массопередачи (коэффициента массопередачи жидкой пленки) K_A (м/с).

$$\frac{dm}{dt} = K_A \cdot A (C_n - C). \quad (13)$$

Массу газа, растворенного в жидкости (удаленного из жидкости) Δm (кг) за время контакта фаз (время всплывания пузырька воздуха ΔT_n (с)), можно определять, преобразовывая уравнение (13) и интегрируя его в интервале изменения переменных dm от 0 до Δm и dt от 0 до ΔT_n

$$\Delta m = K_A \cdot A (C_n - C) \Delta T. \quad (14)$$

Для практических расчетов процессов массопередачи газа через поверхность контакта фаз воздух – вода более удобно вместо пленочного коэффициента массопередачи K_A (м/с) применять величину объемного коэффициента массопередачи $K_w = \frac{A}{W_{ж}}$ (с⁻¹) и выражать скорость массопередачи в объемных единицах концентрации ΔC (кг/м³). С этой целью в уравнении (14) правая и левая части делятся на величину объема барботируемой жидкости $W_{ж}$ (м³):

$$\Delta C = \frac{\Delta m}{W_{ж}} = K_A \cdot \frac{A}{W_{ж}} (C_n - C) \Delta T_n = K_w (C_n - C) \Delta T_n. \quad (15)$$

Уравнение (13) может быть записано в виде

$$\frac{dC}{dt} = K_w (C_n - C). \quad (16)$$

Разделяя переменные в уравнении (16) и интегрируя его в интервале изменения переменных dt от 0 до T и dC от C_0 до C_T , получим:

$$K_w = \frac{1}{T} \ln \frac{(C_n - C_0)}{(C_n - C_T)}, \quad (17)$$

где T – продолжительность процесса барботирования (с); C_n – концентрация насыщения жидкости газом (кг/м³); C_0 – концентрация газа в жидкости в начальный момент

барботирования (кг/м^3); C_T – концентрация газа в жидкости в конечный момент барботирования (кг/м^3).

Уравнение (17) широко используется при обработке результатов экспериментальных исследований систем аэрации, обеспечивающих кислородом воздуха активный ил в аэротенках. Процесс обеспечения кислородом воздуха активного ила в биоокислителях протекает в условиях динамического равновесия, когда окислительная способность системы аэрации (масса кислорода, растворяемого в воде) ОС ($\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$) равна окислительной мощности активного ила (масса кислорода, потребляемого на окисление органических загрязнений активным илом) ОМ ($\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$).

В этом случае процесс массопередачи кислорода воздуха в воду протекает при постоянной величине дефицита кислорода ΔC , а величины K_w , C_n и C являются константами.

Принципиальная схема установки для оценки уровня метаболизма активного ила методом респирометрии представлена на рис. 2.

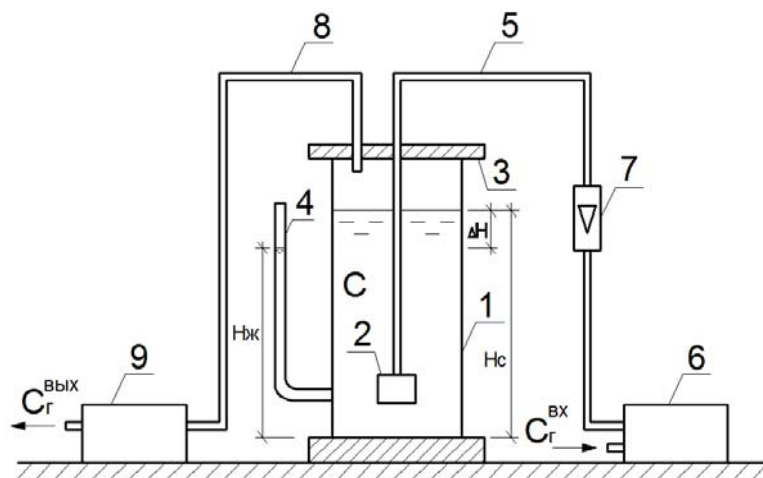


Рис. 2. Принципиальная схема установки для оценки уровня метаболизма активного ила методом респирометрии:

1 – емкость с исследуемой жидкостью (иловой смесью); 2 – воздухораспределительное устройство (аэратор); 3 – герметичная крышка; 4 – пьезометр; 5 – трубопровод подачи сжатого воздуха в воздухораспределительное устройство; 6 – компрессор; 7 – ротаметр; 8 – трубопровод отвода воздуха из емкости с исследуемой жидкостью; 9 – анализатор газового состава отводимого воздуха

При оценке скорости массопередачи кислорода воздуха в жидкость, производимой респирометрическим методом по формуле (17), принимается, что величина концентрации насыщения воды кислородом воздуха C_n (кг/м^3) является постоянной величиной и определяется по формуле

$$C_n = C_{г}^{ВХ} \cdot \alpha, \quad (18)$$

где $C_{г}^{ВХ}$ – концентрация кислорода в воздухе на входе в воздухораспределительное устройство (кг/м^3); α – коэффициент абсорбции кислорода воздуха в воде (коэффициент Бунзена) ($\text{м}^3/\text{м}^3$).

В реальности концентрация кислорода внутри пузырька воздуха в процессе его всплывания будет уменьшаться от величины $C_{г}^{ВХ}$ до значения концентрации отводимого из емкости 1 кислорода в воздухе, измеренной газоанализатором 9, $C_{г}^{ВЫХ}$.

Средняя величина концентрации кислорода в пузырьке воздуха за период его всплывания $C_{г}^{ср}$ (кг/м^3) составит:

$$C_{г}^{ср} = \frac{C_{г}^{ВХ} + C_{г}^{ВЫХ}}{2}. \quad (19)$$

При незначительной глубине жидкости $H_{\text{ж}}$ разница концентраций $\Delta C = C_{\text{г}}^{\text{вх}} - C_{\text{г}}^{\text{вых}}$ не велика.

В процессе расчета промышленных сооружений, имеющих большую глубину аэрируемой жидкости, пренебрежение величиной поправочного коэффициента может привести к значительной погрешности.

Определить величину поправочного коэффициента (коэффициента истощения газовой фазы) можно, учитывая баланс масс сорбируемого газа в газовой и жидкой фазах

$$\Delta m_{\text{ж}} = \Delta m_{\text{г}}, \quad (20)$$

где $\Delta m_{\text{ж}}$ и $\Delta m_{\text{г}}$ – соответственно масса кислорода, растворяемого в жидкости и адсорбируемого из газовой фазы через границу раздела фаз «жидкость – газ» (кг) за время всплывания пузырька воздуха $\Delta T_{\text{п}}$ (с).

Из (18) имеем

$$\Delta C_{\text{ж}} W_{\text{ж}} = \Delta C_{\text{г}} W_{\text{г}}, \quad (21)$$

откуда

$$\Delta C_{\text{г}} = \Delta C_{\text{ж}} \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\text{г}}} = \frac{\Delta C_{\text{ж}}}{\bar{W}}, \quad (22)$$

где $\Delta C_{\text{ж}}$ и $\Delta C_{\text{г}}$ – соответственно изменение концентрации кислорода в воздухе и в воде (кг/м³) за период всплывания пузырька воздуха $\Delta T_{\text{п}}$ (с); $W_{\text{ж}}$ и $W_{\text{г}}$ – соответственно объем жидкой и газовой фаз (м³) в водовоздушной смеси, образующейся в аэрационном бассейне; $\bar{W} = \frac{W_{\text{г}}}{W_{\text{ж}}}$ – относительный объем водовоздушной смеси.

С учетом (22) формула (15) может быть записана в виде

$$\Delta C = K_{\text{в}} \Delta T_{\text{п}} \left[\left(C_{\text{г}} - \frac{\Delta C}{\bar{W}} \right) \alpha - C \right]$$

Поскольку $C_{\text{н}} = C_{\text{г}} \cdot \alpha$, то $\Delta C = K_{\text{в}} \Delta T_{\text{п}} \left(C_{\text{н}} - \frac{\Delta C \cdot \alpha}{\bar{W}} - C \right)$.

Откуда

$$\Delta C + \frac{K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} \cdot \Delta C \cdot \alpha}{\bar{W}} = K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} (C_{\text{н}} - C),$$

$$\Delta C = K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} (C_{\text{н}} - C) \left(1 + \frac{K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} \cdot \alpha}{\bar{W}} \right)^{-1} = K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} (C_{\text{н}} - C) K_{\text{ги}}, \quad (23)$$

где $K_{\text{ги}}$ – коэффициент истощения газовой фазы пузырька воздуха,

$$K_{\text{ги}} = \left(1 + \frac{K_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{п}} \cdot \alpha}{\bar{W}} \right)^{-1}. \quad (24)$$

Представленные в настоящей работе математические зависимости позволяют корректно определять величину коэффициента истощения газовой фазы и учитывать эффект снижения концентрации диффундирующего газа в пузырьке воздуха, всплывающем в аэрационном объеме большой глубины.

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что предложенная методика позволяет корректно рассчитывать и проектировать аппаратное оформление технологии биологической очистки в аэротенках большой глубины.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С.134–139.
2. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов генерации динамических двухфазных систем вода-воздух и их использование в технологиях очистки воды / С.Ю. Андреев. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 194 с.
3. Попкович, Г.С. Система аэрации сточных вод / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. – М.: Стройиздат, 2009.

References

1. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of mass transfer processes kinetics from floating gas bubbles in waste water purification technologies / S.Yu. Andreev, V.G. Gamburg, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P.134–139.
2. Andreev, S.Yu. Theoretical basis of generation of dynamics biphas water – air processes systems and their use in water purification technologies / S.Yu. Andreev. – Penza: PSUAC, 2005. – 194 p.
3. Popcovich, G.S. Waste water aeration system / G.S. Popcovich, B.N. Repin. – M.: CIPH, 2009.

УДК 628.853

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

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

E-mail: algraw@mail.ru

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

E-mail: eremkin@pguas.ru

Ежов Евгений Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Информационно-
вычислительные системы»

E-mail: grev@pguas.ru

Аверкин Юрий Александрович,
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

Averkin Aleksandr Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and gas supply and
Ventilation»

E-mail: algraw@mail.ru

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat and gas supply
and ventilation»

E-mail: eremkin@pguas.ru

Yezhov Yevgeniy Grigoryevich,
Doctor of Sciences in Physics and
Mathematics, Professor of the department
«Information and computing systems»

E-mail: grev@pguas.ru

Averkin Yuri Alexandrovich,
Postgraduate student

СТОЛЕТИЕ *I-d*-ДИАГРАММЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА: УСТРОЙСТВО, ПРИМЕНЕНИЕ, МОДЕРНИЗАЦИЯ

А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин, Е.Г. Ежов, Ю.А. Аверкин

Дана информация о создании *I-d*-диаграммы влажного воздуха, ее модифицированных вариантов с нанесением дополнительных изолиний на рабочую область диаграммы, позволяющих расширить область ее технического применения.

Использование *I-d*-диаграммы влажного воздуха в течение столетнего периода при проектировании систем вентиляции, кондиционирования воздуха, конвективных сушилок подтверждает ее эффективность и востребованность в настоящее время.

Ключевые слова: диаграмма, проектирование, вентиляция, кондиционирование воздуха, конвективная сушилка, сорбенты

CENTURY OF *I-d*-DIAGRAM OF MOIST AIR: DEVICE, APPLICATION, UPGRADE

A.G. Averkin, A.I. Eremkin, Y.Y. Yezhov, Y.A. Averkin

Information on *I-d*-diagram of moist air, its modified versions with the application of additional isolines on the working area of the diagram, allowing to expand the area of its technical application is presented.

The use of *i-d*-diagram of moist air over a hundred-year period in the design of ventilation systems, air conditioning, convection dryers confirms its effectiveness and is in demand at present.

Keywords: diagram, design, ventilation, air conditioning, convective dryer, sorbents

В настоящее время *I-d*-диаграмма влажного воздуха широко применяется на стадии проектирования, реконструкции и анализа работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха, воздушных конвективных сушилок, т.е. технических устройств, где рабочей средой является воздушный поток. Ее использование при графо-

аналитическом методе расчета типовых систем позволяет осуществить выбор оптимальных проектных решений, уменьшить их трудоемкость, обеспечить достаточную точность в соответствии с инженерными требованиями.

Автором I - d -диаграммы влажного воздуха является русский профессор Леонид Константинович Рамзин. Это один из выдающихся российских ученых-теплотехников первой половины XX века. Рамзин Л.К. построил I - d -диаграмму влажного воздуха в 1918 году, столкнувшись с большими трудностями аналитического расчета процессов сушки влажного торфа в топках паровых котлов [1]. Для ее построения использовано базовое уравнение:

$$I = I_{c.в.} + I_{в.п.} = c_{c.в.}t + (r + c_{в.п.}t)d \cdot 10^{-3} = 1,005t + (2500 + 1,8t) \cdot d \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где I , $I_{c.в.}$, $I_{в.п.}$ – соответственно, энтальпия влажного воздуха, энтальпия сухого воздуха, энтальпия водяных паров, кДж/кг; $c_{c.в.}$ – удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·К); $c_{в.п.}$ – удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К); r – удельная теплота парообразования водяного пара, кДж/кг; t – температура воздуха, °С; d – влагосодержание воздуха, г/кг сух. возд.

Значения величин энтальпии воздуха отложены на оси ординат, значения величин влагосодержаний – на оси абсцисс (рис. 1).

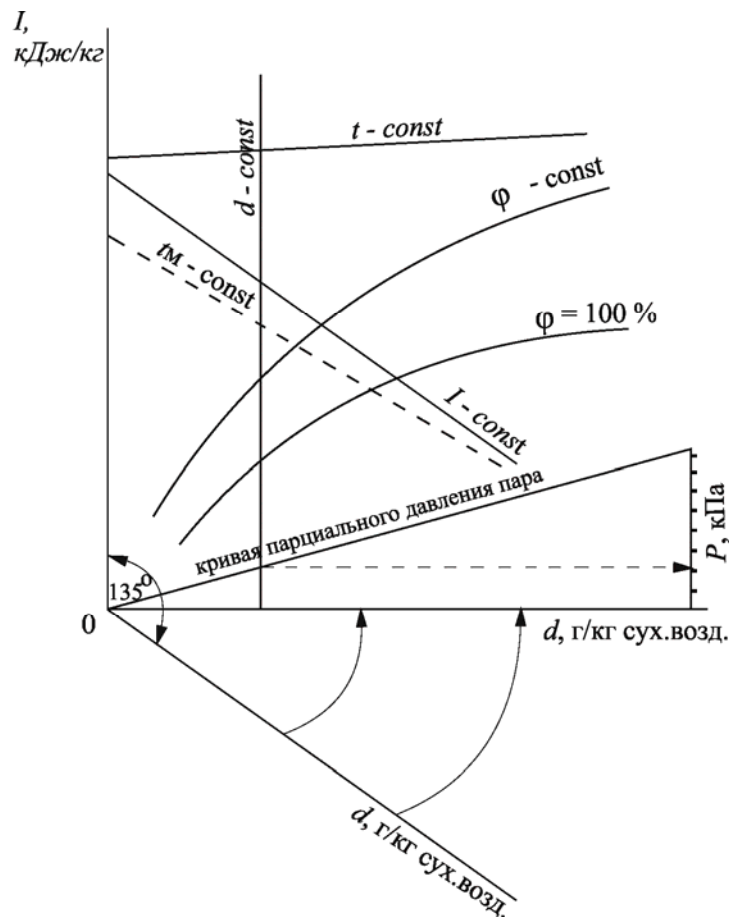


Рис. 1. Изолинии I - d -диаграммы влажного воздуха

I - d -диаграмма соответствует определенному барометрическому давлению P_6 (для регионов Российской Федерации используются I - d -диаграммы для $P_6 = 99$ кПа, $P_6 = 101$ кПа).

Отличительной особенностью I - d -диаграммы влажного воздуха является ее построение не в прямоугольной, а в косоугольной системе координат, что способствует большей наглядности и рациональному использованию площади. Угол между осями составляет 135° . Это позволяет расширить на диаграмме область ненасыщенного

влажного воздуха, которая расположена выше линии $\phi = 100 \%$, т.е. увеличить рабочую площадь диаграммы. Однако на практике $I-d$ -диаграмма влажного воздуха представляется в виде прямоугольной системы координат (для удобства), в ней осью абсцисс является вспомогательная горизонтальная прямая d , на которую в некотором масштабе снесены значения влагосодержаний воздуха с основной оси.

На диаграмму нанесены изолинии для воздуха:

- линии постоянных температур;
- линии постоянных влагосодержаний;
- линии постоянных энтальпий;
- линии постоянных относительных влажностей.

Изотермы – прямые линии, но они не параллельны между собой, т.к. угол наклона их к горизонтальной оси различен. Угол наклона прямых $t = \text{const}$ определяется тангенсом угла, равного $1,89t$, который увеличивается с повышением температуры. Непараллельность изотерм особенно заметна при температурах, близких к $t = 100^\circ\text{C}$; при небольших значениях температур изотермы практически параллельны. В области температур ниже 0°C тангенс угла наклона принимает отрицательные значения, изотермы имеют уклон вниз, их крутизна увеличивается с понижением температуры [1].

Линии относительных влажностей $\phi = \text{const}$ построены с применением уравнения

$$d = 0,623 \frac{\phi P_n}{P_6 - \phi P_n}, \quad (2)$$

где P_n – давление насыщенного водяного пара, кПа; P_6 – барометрическое давление, кПа.

Задаются температурами воздуха $t_1, t_2, \dots, t_n$, соответственно, для каждой температуры определяют давление насыщенного водяного пара P_n (например, по таблицам насыщенного пара [14]). Для выбранного $\phi = \text{const}$ вычисляют по уравнению (2) соответствующие значения $d_1, d_2, \dots, d_n$. По точкам $(t_1, d_1), (t_2, d_2), \dots, (t_n, d_n)$ построена кривая $\phi = \text{const}$. В $I-d$ -диаграмме линии $\phi = \text{const}$ изображаются в виде веера кривых, расходящихся вверх до изотермы, соответствующей температуре насыщения воздуха.

$I-d$ -диаграмма влажного воздуха строится для определенного барометрического давления (для российских регионов выбраны $P_6 = 99$ кПа (~ 745 мм рт.ст.) и $P_6 = 101$ кПа (~ 760 мм рт.ст.) [1]. Барометрическому давлению 745 мм рт.ст. соответствует температура кипения воды $99,4^\circ\text{C}$. При этой температуре давление насыщенного

водяного пара $P_6 = P_n$, и уравнение (2) принимает вид прямой линии: $d = 0,623 \frac{\phi}{1 - \phi}$,

т.е. кривые относительной влажности при $t = 99,4^\circ\text{C}$ преобразуются в вертикальные прямые линии.

Построение линии парциального давления водяного пара P_n осуществляется на основе уравнения

$$P_n = P_6 d / (0,623), \quad (3)$$

что соответствует зависимости $d = f(P_n)$. Ось ординат этого графика является шкалой парциального давления водяного пара P_n и представлена в правом нижнем углу диаграммы. Она позволяет определять влагосодержание воздуха по парциальному давлению находящихся в нем водяных паров или решать обратную задачу (см. рис. 1).

Линии температур мокрого термометра $t_m = \text{const}$ построены следующим образом [1].

При адиабатическом насыщении воздуха с параметрами, отвечающими точке А (рис. 2), парами воды ($\phi = 100 \%$) влагосодержание достигает максимума и соответствует d_m , а температуры воды и воздуха равны температуре мокрого термометра t_m .

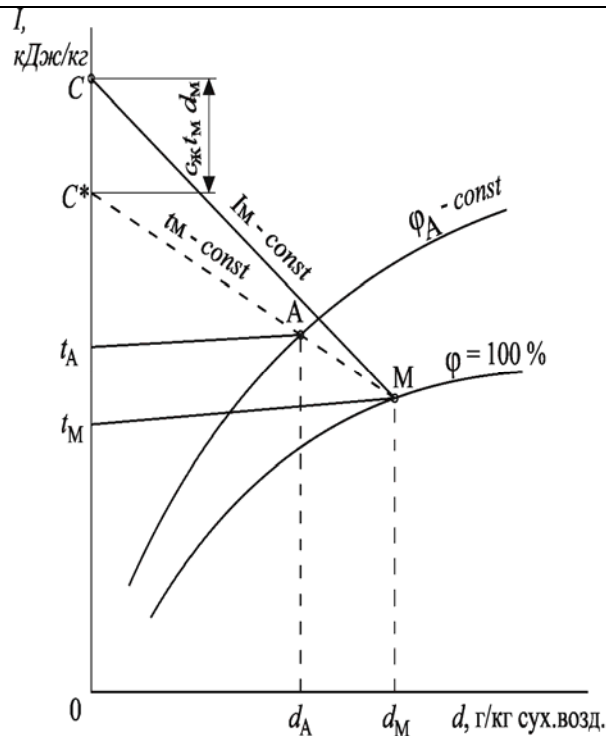


Рис. 2. К построению линии мокрого термометра воздуха $t_m - \text{const}$

Для данных условий

$$I = I_M - c_{ж,t_M}(d_M - d). \quad (4)$$

Для построения линии $t_m - \text{const}$ проводится через точку М вспомогательная линия $I_M - \text{const}$, отвечающую температуре t_m , до пересечения с осью ординат в точке С. По оси ординат (при $d - \text{const}$) откладывается от точки С вниз отрезок, равный $c_{ж,t_M} d_M$. Полученную точку C^* соединяют прямой с точкой М. Эта прямая и является линией $t_m - \text{const}$.

Точка М на диаграмме определяет действительную температуру мокрого термометра воздуха [1]. При построении линий изотерм $t_m - \text{const}$ на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха оказалось, что они настолько близки к изоэнтальпам, что без особой погрешности в технике расчетов принимают этот процесс адиабатным, т.е. идущим по линии $I_A - \text{const}$. По данной причине изотермы $t_m - \text{const}$ обычно не наносятся, чтобы не загромождать поле диаграммы.

Шкала угловых коэффициентов лучей процессов изменения состояния воздуха (шкала тепловлажностных отношений) нанесена по контуру $I-d$ -диаграммы. Тепловлажностные отношения характеризуются величиной ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{\Delta d}, \quad (5)$$

где ΔI , Δd – соответственно, приращение энтальпии, кДж/кг, и влагосодержания, кг/кг сух. воздуха.

Численные значения ε не соответствуют тангенсу угла наклона луча в прямоугольной системе координат. Поэтому для облегчения расчетов и удобства построений процессов изменения состояния воздуха применяют так называемый угловой масштаб, который представляет собой пучок лучей $\varepsilon - \text{const}$, исходящих из нулевой точки диаграммы ($I = 0$ кДж/кг, $t = 0$ °C, $d = 0$). Отрезки этих лучей с численными значениями $\varepsilon = -\infty \dots +\infty$ изображены по периметру $I-d$ -диаграммы.

Использовать для расчетов шкалу величин ε под названием «угловой масштаб» предложил в 1923 году Р.Молье [1].

Рабочий вариант $I-d$ -диаграммы влажного воздуха для умеренных температур воздушной среды приведен на рис. 3,а, для относительно высоких температур воздуха – на рис. 3, б. При выражении влагосодержания в размерности кг/кг сух. возд. используют символ x (это применено на рис. 3, б) [1].

Каждая точка на $I-d$ -диаграмме соответствует определенному тепловлажностному состоянию воздуха. Линия на $I-d$ -диаграмме отвечает процессу тепловлажностной обработки воздуха. Диаграмма удобна не только для определения параметров состояния воздуха, но и для построений изменения его состояния при нагревании, охлаждении, увлажнении, осушении, смешении, а также при выборе необходимой последовательности в реализации процессов тепловлажностной обработки воздуха [2].

За рубежом нашли практическое применение другие варианты диаграммы влажного воздуха (диаграмма Молье, психрометрическая диаграмма и др.), которые были разработаны позднее $I-d$ -диаграммы влажного воздуха Л.К.Рамзина [1].

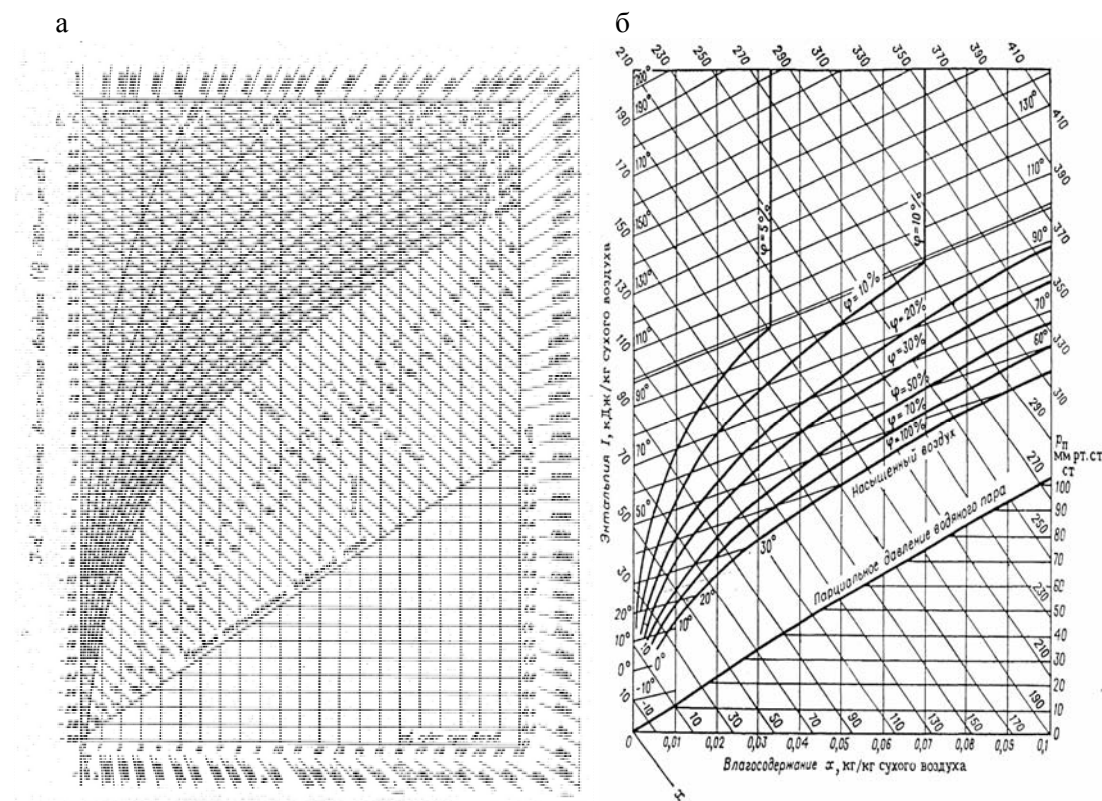


Рис. 3. Рабочие варианты $I-d$ -диаграммы влажного воздуха:

- а – для умеренных температур воздушной среды;
- б – для относительно высоких температур воздуха

Совершенствование конструктивных решений климатехники осуществляется и в настоящее время. С учетом повышения требований по энерго- и ресурсосбережению разрабатываются новые процессы и оборудование тепловлажностной обработки воздуха. В этой связи области применения $I-d$ -диаграммы влажного воздуха постоянно расширяются: от построения и анализа схем тепловлажностной обработки воздуха для выбора марки и компоновки центрального кондиционера до поверочного и конструктивного расчета устройств, работа которых базируется на сложных процессах тепло-массопереноса рабочих сред.

Предложены оригинальные методики расчета утилизаторов теплоты удаляемого воздуха, контактных аппаратов, основанных на дополнительных графических построениях в рабочей области $I-d$ -диаграммы влажного воздуха.

Новатором данного направления следует назвать профессора Кокорина О.Я., который разработал методологию по замене реального режима охлаждения и осушения

воздушного потока, изображенного на I - d -диаграмме влажного воздуха, на условно «сухой» режим охлаждения, который эквивалентен по расходу холода [3].

Нанесение дополнительных изолиний концентраций водных растворов хлористого лития на поле I - d -диаграммы влажного воздуха Павловым Н.Н. в 1970 году позволило эффективно применять ее для проектирования систем осушения воздуха на основе жидких сорбентов [2].

В Пензенском ГУАС разработан метод расчета осушителя воздуха на основе твердого сорбента путем нанесения изолиний равновесных влагосодержаний чужеродного вещества (силикагеля) на рабочую область I - d -диаграммы влажного воздуха (рис. 4) [1]. Построение процесса (рабочей линии) тепловлажностной обработки воздуха на данной диаграмме позволяет определить разность рабочих концентраций, приходящихся на единицу движущей силы процесса, т.е. рассчитать число единиц переноса – n в различных режимах осушения воздуха (адиабатическое осушение: линия 1 – 2; изотермическое осушение: линия 1 – 3) твердым сорбентом, например, методом графического интегрирования. Предлагается следующая последовательность:

- изображается графическая зависимость $D^* = f(d)$ совместно с рабочей линией 1 – 2 или 1 – 3;
- строится графическая зависимость $1/(d - d^*) = f(d)$, где d , d^* – соответственно, текущее и равновесное влагосодержание воздушного потока, г/кг сух. возд.

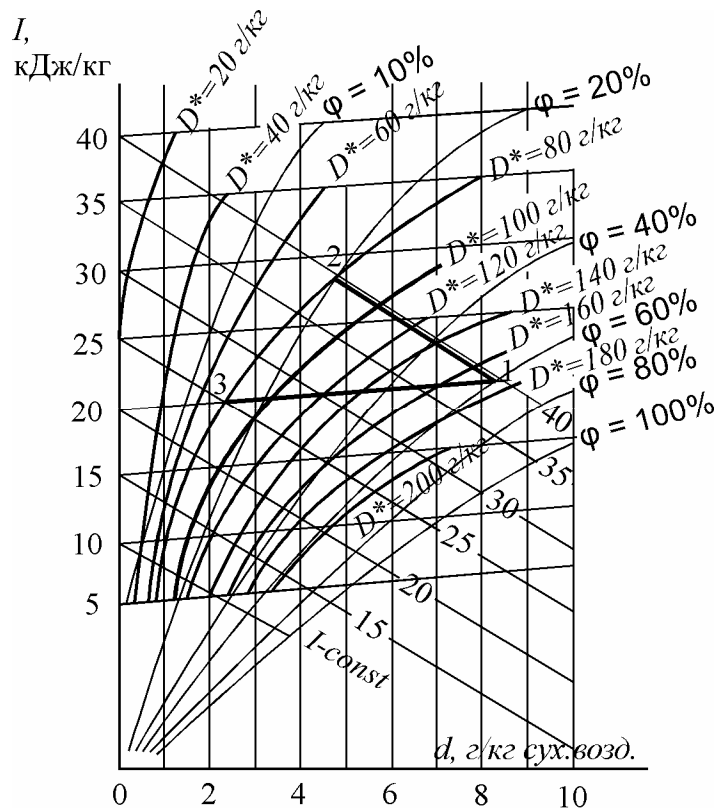


Рис. 4. Фрагмент I - d -диаграммы влажного воздуха с изолиниями равновесных влагосодержаний силикагеля – D^* , г/кг

На графике выделяют криволинейную трапецию, ограниченную осью абсцисс в интервале $d_1 - d_{2(3)}$ и кривой $1/(d - d^*) = f(d)$;

- определяется число единиц переноса

$$n = \int_{d_{2(3)}}^{d_1} \frac{\partial d}{d - D^*} = f \cdot M_1 \cdot M_2, \quad (6)$$

где M_1 , M_2 – масштабы величин по координатным осям; f – площадь криволинейной трапеции.

Научно обоснован метод расчета контактных аппаратов в режимах адиабатического увлажнения и охлаждения воздуха, его осушения и охлаждения в политропических условиях на основе числа единиц переноса. Определение же числа единиц переноса базируется на построении рабочей и равновесной линий, которые являются базовыми при проектировании СКВ [2].

Расширению функций и области применения *I-d*-диаграммы влажного воздуха способствует разработка компьютерных программных продуктов, позволяющих автоматизировать сложные расчеты тепломассообменных процессов и выполнять графические построения в удобном для потребителей интерфейсе.

Таким образом, применение *I-d*-диаграммы влажного воздуха в течение столетнего периода при инженерном проектировании большого класса промышленного оборудования, в том числе для обеспечения микроклимата помещений, подтверждает ее эффективность и востребованность в настоящее время.

Список литературы

1. Аверкин, А.Г. *I-d*-диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств / А.Г. Аверкин. – СПб.: Лань, 2016. – 192 с.
2. Аверкин, А.Г. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатехники: монография / А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 204 с.

References

1. Averkin, A.G. *I-d*-diagram of humid air and its application in the design of technical devices / A.G. Averkin. – SPb.: DOE, 2016. – 192 p.
2. Averkin, A.G. Improvement of devices of heat and humidity treatment of air and methods of calculating HVAC: monograph / A.G. Averkin, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2015. – 204 p.

УДК 677.027.12:519.87

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Баканова Светлана Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: SvBakanova@mail.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

Родионов Юрий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
директор автомобильно-дорожного
института
E-mail: rodionov@pguas.ru

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: zigK@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

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat and gas supply
and ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Bakanova Svetlana Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of department of «Heat and gas supply and
ventilation»
E-mail: SvBakanova@mail.ru

Koshev Alexander Nikolaevich,
Doctor of Chemical Sciences,
Professor of the department «Information and
computing systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

Rodionov Yuri Vladimirovich,
Doctor of Science, Professor
E-mail: rodionov@pguas.ru

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УВЛАЖНЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

А.И. Ерёмкин, С.В. Баканова, А.Н. Кошев, Ю.В. Родионов, О.В. Тараканов

Рассматривается математическая модель процесса увлажнения пористого текстильного материала в форме дифференциального уравнения второго порядка с целью численного моделирования изменения относительной влажности кондиционированного воздуха в объеме компактно сформированного полуфабриката текстильного производства.

Ключевые слова: текстильный материал, влажный воздух, пористая среда, термодиффузия, кондиционируемый воздух

MATHEMATICAL MODEL OF TEXTILE MATERIAL HYDRATION

A.I. Eremkin, S.V. Bakanova, A.N. Koshev, Y.V. Rodionov, O.V. Tarakanov

The mathematical model of process of wetting the porous textile material in the form of a differential equation of the second order numerical simulation of changes in the relative humidity of the conditioned air in the volume of the compact formed of the prefabricated textile production are given.

Keywords: textile material, humid air, porous medium, thermal diffusion, conditioned airflow

В последние годы потребление продукции лёгкой промышленности интенсивно растёт, возрастают требования к качеству изделий, выпускаемых на предприятиях отрасли. При этом возрастает роль применяемого высокотехнологичного оборудования, материалов и инновационной продукции.

В настоящее время важным является не только техническое перевооружение промышленности, финансовая поддержка производителей, но и научные исследования в области создания микроклиматических условий в производственных помещениях. Это необходимо для поддержания требуемого влагосодержания перерабатываемых текстильных волокон, полуфабрикатов пряжи, нитей и тканей. Перерабатываемое натуральное сырьё на текстильных предприятиях можно рассматривать как капиллярно-пористый коллоидный материал, интенсивно отдающий и поглощающий влагу из окружающего воздуха за счёт адсорбционных сил. Адсорбционная влага в текстильных волокнах определяет физико-механические свойства материалов и их прочностные характеристики, а также качество протекания технологических процессов.

В процессе производства продукции следует эффективно управлять влагосодержанием текстильных материалов в процессах при их взаимодействии с температурно-влажностной средой в помещении.

Возникает необходимость в специальных теоретических исследованиях процессов взаимодействия перерабатываемых текстильных материалов с кондиционированным воздухом в помещении и воздухом, находящимся внутри структуры объёма текстильного материала. Полученные результаты позволяют определить конкретные температуры и относительную влажность воздуха в помещении и внутри структуры текстильных материалов, которые обеспечивают требуемое по технологии значение влагосодержания текстильных волокон. Это дает возможность повысить эффективность технологических процессов прядения и изготовления тканей, а также обеспечить выпуск конкурентной продукции.

Установлено, что изменение концентрации влаги в компактно сформированном текстильном материале во времени подчиняется уравнению диффузии с учётом фильтрационного переноса [5]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(j_{\text{сум}}), \quad (1)$$

где c – концентрация влаги в материале, кг/м^3 ; τ – время, с ; $j_{\text{сум}}$ – плотность суммарного потока влаги в материале, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Для концентрации влаги в материале имеем:

$$c = \gamma_0 \cdot W(\varphi), \quad (2)$$

где γ_0 – плотность материала в сухом состоянии, кг/м^3 ; $W(\varphi)$ – влажность материала в функции относительной влажности воздуха, определяемая изотермой сорбции, кг/кг .

Подставив уравнение (2) в левую часть уравнения (1), получим следующее выражение:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial(\gamma_0 \cdot W(\varphi))}{\partial \tau} = \gamma_0 \frac{\partial W(\varphi)}{\partial \tau} = \gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(j_{\text{сум}}). \quad (4)$$

Величина $\frac{\partial W}{\partial \varphi}$ является производной изотермы сорбции и представляет собой

влагоемкость материала, смысл которой заключается в том, что она показывает приращение количества влаги, приходящееся на приращение относительной влажности

воздуха. Эта величина в общем случае нелинейно зависит от относительной влажности воздуха φ , что обуславливает нелинейность уравнений (1) и (3). Именно с помощью этого параметра в данном случае учитывается поглощение влаги за счет сорбции из окружающей среды.

Плотность суммарного потока влаги в материале равна сумме плотностей потоков влаги, обусловленных различными физическими потенциалами. В данной задаче рассматриваются два потока влаги:

$j_{\text{прин}}$ – поток, обусловленный движением воздуха в пористой среде, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

$j_{\text{дифф}}$ – поток, обусловленный диффузией влаги, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Для потока, обусловленного движением воздуха в пористой среде, имеем:

$$j_{\text{прин}} = -c_{\text{в}} \cdot \frac{i}{\gamma_{\text{в}}} \overline{\text{grad } P}, \quad (5)$$

где $c_{\text{в}}$ – концентрация влаги в подаваемом воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$; i – коэффициент воздухопроницаемости материала, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность подаваемого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\overline{\text{grad } P}$ – градиент давления, $\text{Па}/\text{м}$.

Для потока диффузии влаги справедливо уравнение [1, 2]

$$j_{\text{дифф}} = -D \cdot \overline{\text{grad } P}, \quad (6)$$

где D – усредненный коэффициент диффузии водяного пара в рассматриваемой пористой среде, $\text{м}^2/\text{с}$.

Выражение (6) можно преобразовать следующим образом:

$$j_{\text{дифф}} = -D \cdot \overline{\text{grad } c} = -D \cdot \overline{\text{grad } (\gamma_0 \cdot W)} = -D \cdot \gamma_0 \frac{\partial W}{\partial \varphi} \overline{\text{grad } \varphi}. \quad (7)$$

Здесь, как и ранее, значение D является некоторым рабочим параметром, позволяющим усредненно описывать процесс диффузии влаги в пористой среде.

Вернемся к уравнению (1). Имеем:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\text{div} (j_{\text{прин}} + j_{\text{дифф}}). \quad (8)$$

С учетом уравнений (4) и (6) получим:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\text{div} \left(c_{\text{в}} \frac{i}{\gamma_{\text{в}}} \overline{\text{grad } P} + D \cdot \overline{\text{grad } c} \right). \quad (9)$$

Дальнейшие преобразования осуществим с учетом того, что все участки поверхности бобины с ровницей равнодоступны для подаваемого воздуха, а перепад давления воздушной смеси в объеме текстильного материала незначителен ($\overline{\text{grad } P} \approx 0$) и им можно пренебречь. Такая ситуация реализуется, например, когда скорость подачи влажного воздуха в рабочую зону текстильной машины не велика, а компактно сформированный текстильный материал имеет достаточно высокую плотность. Пренебрегаем также потоком влаги через торцевые участки бобины. При этом поток влаги, обусловленный движением воздуха в пористой среде вследствие принудительной подачи воздуха, обращается в нуль вследствие симметрии принятых условий равнодоступности поверхности бобины для подаваемого воздуха. В рамках таких предположений многомерное уравнение (9) упрощается до одномерного, записанного в цилиндрических координатах:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = D \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (10)$$

Преобразуем правую часть этого уравнения, используя выражение (5):

$$\begin{aligned}\gamma_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} &= D \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = \gamma_0 \cdot D \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W(\varphi)}{\partial r} \right) = \\ &= \gamma_0 \cdot D \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot r \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = \\ &= \gamma_0 \cdot D \cdot \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi} \right) \cdot \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right] = \\ &= \gamma_0 \cdot D \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi} \right) \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi} \right) \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right].\end{aligned}\quad (11)$$

Введем обозначение для пароемкости материала:

$$\xi = \frac{\partial W(\varphi)}{\partial \varphi}.\quad (12)$$

Влагоемкость материала $\xi(\varphi)$ определяется дифференцированием уравнения изотермы сорбции:

$$\xi(\varphi) = \frac{\partial W}{\partial \varphi} = k_1 k_2 \cdot e^{k_1(\varphi - \varphi_c) +} \frac{1 + \left(\frac{W_M}{W_H} - 1 \right) \cdot e^{-k\varphi} + W_M \cdot k \cdot \left(\frac{W_M}{W_H} - 1 \right) \cdot e^{-k\varphi}}{\left(1 + \left(\frac{W_M}{W_H} - 1 \right) \cdot e^{-k\varphi} \right)^2}.$$

Подставив уравнение (11) в уравнение (12), получим:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = D \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \xi(\varphi)}{\partial r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + D \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right).\quad (13)$$

Дальнейшие преобразования приводят к уравнению

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = D \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial \xi(\varphi)}{\partial r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + D \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + D \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right).\quad (14)$$

Граничное условие влагообмена на поверхности бобины сформулируем с использованием теории, изложенной в работах А.В. Лыкова [1, 2], в виде:

$$j|_{x=R_1} = \beta_c (c_b - c_n),$$

где β_c – коэффициент влагообмена, отнесенный к разности концентраций влаги, м/с; c_b – концентрация влаги в подаваемом воздухе, кг/м³; c_n – концентрация влаги в поверхностном слое материала, кг/м³.

Концентрацию водяного пара в воздухе можно выразить с помощью выражения, вытекающего из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$c_b = \frac{e}{R_n \cdot T} = \frac{e \cdot E}{R_n \cdot T \cdot E} = \frac{\varphi}{R_n \cdot T \cdot E}.$$

Отсюда следует, что

$$\beta_\varphi = \frac{\beta_c}{R_n \cdot T \cdot E},$$

где R_n – газовая постоянная для водяного пара, Дж/(кг·К), равная 461,52; E – давление насыщенного водяного пара, Па.

Уравнение влагообмена на поверхности бобины принимает вид:

$$j|_{x=R_1} = \beta_\phi (\varphi_\text{в} - \varphi_\text{пов}),$$

где R_1 – коэффициент влагообмена, отнесенный к разности относительной влажности воздуха, м/с; $\varphi_\text{в}$ – концентрация влаги в подаваемом воздухе, доли ед.; $\varphi_\text{пов}$ – относительная влажность воздуха в поверхностном слое материала, доли ед.

Коэффициент влагообмена β_ϕ , отнесенный к разности концентраций влаги, можно определить из критериального уравнения, предложенного Леонтьевым (определяет связь между теплообменом и массообменом):

$$\beta_\phi = \frac{\alpha_\kappa (Pr)^{\frac{2}{3}}}{\rho_\text{в} C_\text{в} (Pr')^{\frac{2}{3}}},$$

где α_κ – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C); Pr – термический критерий Прандтля, $Pr = \nu/a$ (здесь ν – коэффициент кинематический вязкости воздуха, м²/с; a – коэффициент температуропроводности воздушно-водяной смеси, м²/с); $\rho_\text{в}$ – плотность влажного воздуха, кг/м³; $C_\text{в}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); Pr' – диффузионный коэффициент Прандтля, $Pr' = \nu/D_0$.

Расчет коэффициента диффузии паровоздушной смеси D определяется по формуле [3]

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \frac{101}{P_6},$$

где D_0 – коэффициент диффузии воздушно-водяной смеси при температуре 0°C и барометрическом давлении, равном 101 кПа, $D_0 = 0,08$ м/с; P_6 – барометрическое давление, кПа; T – абсолютная температура воздушно-водяной смеси, К.

Удельная теплоемкость влажного воздуха равна сумме теплоемкостей сухого воздуха $C_\text{св}$ и водяного пара $C_\text{п}$, содержащегося в воздухе:

$$C_\text{в} = C_\text{св} + C_\text{п} d,$$

где d – влагосодержание воздуха, т.е. отношение массы пара к массе сухого воздуха, содержащегося в единице объема влажного воздуха, кг/кг.

Влагосодержание воздуха выражается через концентрацию пара в воздухе по формуле

$$d = \frac{c_\text{в}}{\rho_\text{св}},$$

где $\rho_\text{св}$ – плотность сухого воздуха, зависящая от температуры и определяемая по формуле

$$\rho_\text{св} = \frac{353}{273 + t}.$$

Коэффициент конвективного теплообмена α_κ при принудительной вентиляции можно определить по формуле Франка [4]:

$$\alpha_\kappa = 6,31 \nu^{0,656} + 3,25^{-1,91 \nu},$$

где ν – скорость движения воздуха, м/с.

Для расчета коэффициента влагообмена β_ϕ принимаются следующие значения параметров, входящих в уравнения:

– коэффициент диффузии воздушно-водяной смеси при температуре 0°C и барометрическом давлении, равном 101 кПа, $D_0 = 0,08$ м²/с;

– коэффициент кинематической вязкости $\nu = 1,62 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

– коэффициент температуропроводности $\alpha = 2,21 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Граничное условие влагообмена на внутренней поверхности катушки бобины принимаем *второго рода* в виде:

$$j|_{x=R_0} = 0.$$

Для численного решения задачи необходимо сформулировать конечно-разностное представление уравнения влагопереноса в бобине.

Разобьём ось бобины от значения радиуса R_0 до R_1 на n равных интервалов так, что длина одного интервала составит:

$$\Delta r = \frac{R_1 - R_0}{n}.$$

Границы интервалов занумеруем и их координаты обозначим:

$$r_1 = R_0, \dots, r_{i+1} = r_i + \Delta r, \dots, r_{n+1} = r_n + \Delta r.$$

Введем также шаг по времени $\Delta \tau$ при начальном значении $\tau_0 = 0$. На введенной таким образом сетке аппроксимируем уравнение (14) в конечно-разностное по явной схеме. Аппроксимация производных в i -м узле сетки будет следующей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} &\approx \frac{\varphi_i^{\Delta \tau} - \varphi_i}{\Delta \tau}; & \frac{\partial \varphi}{\partial r} &\approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r}; \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} &\approx \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{(\Delta r)^2}; & \frac{\partial \xi(\varphi)}{\partial r} &\approx \frac{\xi(\varphi_{i+1}) - \xi(\varphi_i)}{\Delta r}. \end{aligned}$$

Следовательно, для каждого узла сетки при значениях i от 2 до n уравнение можно представить в виде:

$$\varphi_i^{\Delta \tau} = \varphi_i + D \cdot \nabla \tau \times \left[\frac{1}{\xi(\varphi_i)} \cdot \frac{\xi(\varphi_{i+1}) - \xi(\varphi_i)}{\Delta r} \cdot \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} + \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{(\Delta r)^2} \right]. \quad (15)$$

Это уравнение можно использовать для расчета значений $\varphi_i^{\Delta \tau}$ во всех внутренних точках сети. Для расчета значения $\varphi_{n+1}^{\Delta \tau}$ преобразуем это уравнение к виду, в котором выделено выражение $\left(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} \right)$, которое обозначим ξ_I :

$$\begin{aligned} \varphi_i^{\Delta \tau} = \varphi_i + D \cdot \nabla \tau \cdot &\left[\frac{1}{\xi(\varphi_i)} \cdot \frac{\xi(\varphi_{i+1}) - \xi(\varphi_i)}{\Delta \varphi} \cdot \left(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} \right)^2 + \right. \\ &\left. + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} + \frac{1}{\Delta r} \cdot \left(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta r} - \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\Delta r} \right) \right]. \end{aligned}$$

Из выражения граничного условия на внешней границе бобины имеем:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{x=R_1} = \frac{\beta_\Phi (\varphi_\text{в} - \varphi_\text{пов})}{D \cdot \gamma \cdot \xi(\varphi)}. \quad (16)$$

Примем это выражение в качестве ξ_{n+1} для значения $i=n+1$, при этом

$$\xi_{n+1} = \frac{\beta_\Phi (\varphi_\text{в} - \varphi_{n+1})}{D \cdot \gamma \cdot \xi(\varphi_{n+1})}.$$

Конечно-разностное уравнение для этой точки сетки принимает вид:

$$\varphi_{n+1}^{\Delta\tau} = \varphi_{n+1} + D \cdot \nabla \tau \cdot \left[\frac{1}{\xi(\varphi_{n+1})} \cdot \frac{\xi(\varphi_{n+1}) - \xi(\varphi_n)}{\nabla \varphi} \cdot (\varsigma_{n+1})^2 + + \frac{1}{r_n} \cdot \varsigma_{n+1} + \frac{1}{\Delta r} \cdot \left(\varsigma_{n+1} - \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{\nabla r} \right) \right].$$

Аналогично запишем уравнение граничного условия для внутренней границы бобины в виде:

$$j|_{x=R_0} = D \cdot \gamma \cdot \xi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{x=R_1} = 0. \quad (17)$$

По (15), (17) можно рассчитать распределение процесса увлажнения пористой среды – компактно сформированного текстильного материала – в различные моменты времени ведения процесса.

Выводы

Разработана математическая модель процесса увлажнения пористого текстильного материала в форме задачи Коши для дифференциального уравнения второго порядка с целью численного моделирования изменения относительной влажности кондиционированного воздуха в объеме компактно сформированного полуфабриката текстильного производства. Показана классическая неустойчивость задачи, рассмотрены методы ее решения, произведено численное решение задачи для различных вариантов технологических условий организации процесса увлажнения.

Численные расчеты показали, что относительная влажность воздушного потока монотонно уменьшается с удалением от поверхности до некоторого предельного значения.

Список литературы

1. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки увлажнения / А.В. Лыков – М.-Л.: Легкая промышленность, 1938.
2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
3. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А.В. Нестеренко. – М.: Высшая школа, 1971. – 459 с.
4. Фокин, К.Д. Сорбция водяного пара строительными материалами / К.Д. Фокин // Вопросы строительной физики и проектирования. – М. – Л., 1939. – 24–37 с.
5. Закономерности процесса увлажнения текстильного материала / А.И. Еремкин [и др.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – April 2017. – Vol 12, N 0-7. – P. 2265–2270.

References

1. Lykov, A. V. Kinetics and dynamics of drying processes of hydration / A.V. Lykov. – M.-L.: Light industry, 1938.
2. Lykov, A.V. Theory of drying / A. V. Lykov. – M.: Energy, 1968. – 471 p.
3. Nesterenko, A.V. fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning / A. V. Nesterenko. – M.: Vysshaya SHKOLA, 1971. – 459 p.
4. Fokin, K. D. Sorption of water vapour in building materials / K. D. Fokin // Questions of building physics and design. – M.-L/, 1939. – P. 24–37.
5. . Textile material Humidification patterns / I.A. Eremkin [etc.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – April 2017. – Vol 12, N 0-7. – P. 2265–2270.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72.035 (470.341-25)

*Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 603950, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел.: (831) 430-54-92; факс: (831) 430-19-36
ООО «Асгард»
Россия, 603093, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 81. оф. 7,
тел. (831) 434-21-07

Шумилкин Александр Сергеевич,
кандидат архитектуры, доцент кафедры
«История архитектуры и основы
архитектурного проектирования»,
главный архитектор
E-mail: info@asgard-arch.ru

*The Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering*
Russia, 603950, Nizhny Novgorod, 65b,
Iljinskaya St.,
tel: +7 (831) 430-54-92; fax (831) 430-19-36
Ltd «Asgard»
Russia, 603093, Nizhny Novgorod, 81,
Iljinskaya St.,
tel: +7 (831) 434-21-07

Shumilkin Alexander Sergeyevich,
Candidate of Architecture, Associate Professor
of the department «History of architecture and
the foundations of architectural design»,
chief architect Ltd
E-mail: info@asgard-arch.ru

СОХРАНЕНИЕ ИСТОРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗДАНИЯ РЕМЕСЛЕННОЙ УПРАВЫ В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ)

А.С. Шумилкин

Рассмотрена проблема сохранения исторической среды в условиях современного градостроительства, подняты вопросы взаимодействия новой и исторической застройки центров крупных городов. Приведена методология реставрации Ремесленной управы в Нижнем Новгороде – исторического здания и эстетической доминанты городского пространства.

Ключевые слова: историко-градостроительная среда, средовой подход, стилистическая реставрация

PRESERVATION OF HISTORIC ENVIRONMENT IN TERMS OF URBAN DEVELOPMENT (ON THE EXAMPLE OF CRAFT COUNCIL BUILDING IN NIZHNY NOVGOROD)

A.S. Shumilkin

The problem of preserving the historic environment in the present urban development raised the issues of interaction of new and historic buildings in the centers of cities. Methodology of the restoration of the Craft Council Building in Nizhny Novgorod – the historical buildings and aesthetic dominant of the urban space are given.

Keywords: historical and urban environment, environmental approach, stylistic restoration

Актуальной проблемой в сфере охраны культурного наследия является сохранение городских культурных ландшафтов. В условиях интенсивного развития урбанизированных территорий значительная часть наследия сегодня оказывается под угрозой исчезновения. Особенно остро эта проблема выявляется в процессе реконструкции исторических центров крупных городов.

Современные теоретические подходы к сохранению городского наследия базируются на понимании значения среды города как самостоятельного и полноценного памятника, объединяющего многообразные элементы предметно-пространственного окружения. Средовой подход дает возможность рассматривать отдельные памятники во взаимосвязи с их историческим архитектурным контекстом и естественным ландшафтным окружением.

Особенностью формирования среды большинства городов является ее постоянное, часто кардинальное обновление и дополнение новыми включениями. Это обусловило сосуществование построек разных исторических периодов со своими масштабными, объемно-композиционными и стилистическими особенностями в структуре районов, кварталов, улиц. Вместе с тем традиционные городские ландшафты можно рассматривать как многоплановые структуры, образованные на принципах гармонии, дополнения и масштабного соподчинения обладающих индивидуальным своеобразием элементов.

С распространением в XX веке новейших строительных технологий архитектурные включения в историческую среду часто стали носить диссонирующий характер, нарушая целостность градостроительного контекста. Средовой подход получил развитие как метод проектирования в условиях исторической застройки, когда ее стилевые и морфологические параметры стали использоваться в качестве основы для формообразования новых зданий и адаптации их в средовой контекст [1: 22]. Вместе с тем обратной стороной этого подхода, часто наблюдаемой в практике современного отечественного градостроительства, можно назвать тенденцию полного замещения исторической застройки городских центров объектами нового строительства. Копируя внешние формы и детали исторической архитектуры, новые здания зачастую подавляют подлинное окружение своим масштабом, конструкциями, современной отделкой.

Противостояние новой и старой застройки усугубляется неудовлетворительным, часто аварийным состоянием исторических зданий и их территорий. Десятилетиями не получая ремонта, эти постройки заносятся в категорию «ветхого фонда». Сохраняющиеся кварталы с застройкой вековой и более давности вызывают ассоциации с неблагополучной социальной средой. В противовес этому новые здания с признаками современной архитектуры встречают положительный отклик даже несмотря на то, что возводятся они на месте безвозвратно утрачиваемого прошлого. Так, исторический центр Нижнего Новгорода за последние десятилетия пережил три волны архитектурного бума [2: 30], в результате которого к настоящему моменту трудно перечислить утраты фрагментов уличной и внутриквартальной застройки XIX – XX веков (район пл. Лядова, ул. Горького, М.Ямская, Белинского, Короленко, Новая, Студеная, Семашко, Ковалихинская, Октябрьская, Блохиной).

Вопросы восстановления значимости культурного наследия как ресурса градостроительного развития не теряют своей актуальности. В связи с этим задача реставрации, основной целью которой является продление жизни памятника, видится, в том числе, в восстановлении восприятия его как эстетической доминанты городского пространства. Понимание особенностей работы в исторической среде во многом обуславливает выбор методологических подходов к процессу сохранения памятника.

Одним из недавно реализованных примеров в нижегородской реставрационной практике является дом № 25 (литера А) по улице Октябрьской – здание бывшей Ремесленной управы, более известное как Горьковский Дом ученых.

Здание расположено в центральной части города в историческом квартале, ограниченном Алексеевской, Грузинской (быв. Болотов пер.), Октябрьской (быв. Дворянская) и Ошарской улицами. Памятник входит в ансамбль усадебной двух-трехэтажной преимущественно каменной застройки улицы Октябрьской, северным фасадом

формирует ее красную линию. Предназначавшийся для солидного учреждения и обладающий характерной объемно-пространственной композицией, особняк в кирпичном стиле являлся архитектурным акцентом в застройке улицы.

Сейчас эту часть исторического центра в районе Черного пруда затронули значительные градостроительные изменения. Полностью снесена застройка XIX – XX веков противоположной стороны ул. Октябрьской, а на ее месте в 2008 году возведен грандиозный многофункциональный центр, занявший почти весь исторический квартал. Внедрение в историческую ткань отразилось на окружающей застройке: современное здание стало новой архитектурной доминантой, подавив значение сложившегося градостроительного ансамбля чуждыми ему масштабными, пространственными и стилевыми характеристиками. Непосредственно это коснулось отрезка улицы Октябрьской, где застройка организована не по принципу сплошного фасада (брандмаурный тип, преобладающий на центральных улицах), а представляет собой типологически разнообразные постройки, расположенные в дисперсном порядке со значительными разрывами. На этом историческом отрезке и находится здание Ремесленной управы, выполняя роль архитектурного акцента и сдерживая натиск современной застройки.

Примечательна история строительства, и непроста судьба памятника [3: 28]. Идея возведения собственного дома возникла в среде ремесленной корпорации: для поднятия производительности в нем предполагалось организовать училище для обучения различным ремеслам. Проект был утвержден в 1891 году, надзор за строительством поручен городскому архитектору Н.Д. Григорьеву. К сожалению, авторство проекта и чертежи обнаружить не удалось. Первоначальный облик здания зафиксирован на архивной фотографии, сделанной в начале XX века М.П. Дмитриевым.

Строительство дома было завершено в 1892 году. Здание возводилось на средства членов Нижегородского цехового общества и пожертвования ремесленников. Примечательно, что многие работы и почти вся внутренняя отделка были также сделаны безвозмездно силами ремесленников (рис. 1).



Рис. 1. Здание Ремесленной управы, начало XX в. (фото М.П. Дмитриева)

Дом Ремесленной управы стал наиболее удачным строительным проектом местного ремесленного общества и составлял предмет его гордости. В годы Первой мировой войны в здании размещался лазарет для воинов. После национализации в нем находился Нижегородский деловой клуб, а с 1929 года – Дом инженерно-технических работников. Позже в здании разместился Горьковский дом ученых. Сегодня здесь находится Нижегородский научно-информационный центр. За более чем вековую историю облик здания менялся, но в целом сохранил репрезентативность солидного общественного учреждения.

Трехэтажный кирпичный неоштукатуренный основной объем здания под вальмовой крышей первоначально был выстроен симметрично в форме буквы «Т». Со стороны дворового (южного) фасада расположен ризалит, в котором помещена лестничная клетка.

На центральной оси симметричного главного фасада расположен парадный вход в здание. Средняя часть выделена поэтажными лопатками и акцентирована прямоугольным аттиком. Аналогичные лопатки, декорированные «под руст» в уровне первого и второго этажей и дополненные вертикальными нишами на третьем этаже, подчеркивают углы здания. Фасад разделен по горизонтали кирпичными междуэтажными поясами. Пояс над вторым этажом дополнен полосой из выступающих горизонтальных ширинок и орнаментом в виде сухариков.

Кирпичный декор основной плоскости фасада образует геометрический рисунок, обрамляющий проемы и заполняющий простенки элементами в виде узких лопаток. Прямоугольные окна в рамочных наличниках в уровне первого этажа дополнены навершиями лучкового очертания, над пониженными оконными проемами третьего этажа помещены замковые камни. Пространство под карнизами второго и третьего этажей декорировано филёнками с геометрическим заполнением.

Боковые и дворовый фасады имеют более сдержанное декоративное решение. Боковые фасады основного объема оформлены поэтажными лопатками, прямоугольные окна обведены рамочными наличниками. Этажи разделены профилированными поясами. Венчающий карниз дополнен поребриком (рис. 2).

Проведенные исследования выявили ряд изменений первоначального облика здания. С юго-западной стороны пристроен трехэтажный оштукатуренный объем, объединенный декоративным решением с историческими фасадами. Со стороны восточного фасада примыкает поздний двухэтажный оштукатуренный пристрой из силикатного кирпича. Техническое состояние здания характеризуется износом внешних архитектурно-конструктивных элементов. Имеются фрагментарные разрушения кирпичного декора на главном и дворовых фасадах (междуэтажных поясов, лопаток, аттика), утраты первоначальных угловых декоративных элементов на кровле. Часть окон южного и восточного фасадов заложены или изменены их первоначальные размеры. Разнохарактерное заполнение оконных проемов (частично замененное на пластиковые окна) не соответствует историческому облику объекта культурного наследия. В процессе расчистки стен от поздних окрасочных слоев (толщина до 5 мм) выявилось их неудовлетворительное состояние: выкрашивание подлинного кирпича, следы поздних ремонтов, цементно-песчаные докомпоновки, выходы солей, поражение домовым грибом.

Основные задачи проекта реставрации были направлены на возвращение зданию утраченного значения архитектурного акцента исторического ансамбля застройки Октябрьской улицы [3: 29]. Прежде всего, была проведена работа по восстановлению подлинной открытой кирпичной кладки, зафиксированной на фотографии начала XX века. Поздние пристрой советского периода из силикатного кирпича выделены нейтральным цветом и оштукатурены. Выполнена докомпоновка утрат и сколов оконных наличников. Был обновлен фасадный декоративный наличник двери парадного входа, произведена замена поздних дверных полотен (рис. 3).



Рис. 2. Здание Ремесленной управы (ул. Октябрьская, 25) до реставрации



Рис. 3. Здание Ремесленной управы (ул. Октябрьская, 25) после реставрации

С целью возвращения здания к историческому облику были раскрыты два подлинных окна бокового фасада и восстановлена шестичастная расстекловка окон. Утраченное после 1917 года декоративное заполнение аттика (герб Ремесленной управы) заменено современным гербом Нижегородской области. Восстановлены инженерно-технические элементы и системы (отмостка, организованный водоотвод). Вдоль главного фасада здания смонтировано защитное ограждение.

Задача максимального сохранения исторических подлинных элементов и материалов потребовала применения обширного комплекса высококачественных реставрационно-технологических мероприятий. Памятник был оснащен системой ночной подсветки, подчеркнувшей рельефность фасадов и пластику архитектурных деталей.

Проведенные реставрационные работы позволили вернуть зданию значение архитектурного акцента в историческом ансамбле одной из центральных улиц Нижнего Новгорода. Этой задачей проекта был определен выбор методологического подхода, включавшего элементы стилистической реставрации и позволившего восстановить первоначальный облик памятника. Зданию возвращена эстетика кирпичного стиля – рационального направления эклектики, характерного для нижегородской архитектуры определенного периода. Обоснованием данного решения стала его строгая документальная подтвержденность историческими материалами начала XX века.

Задача сохранения наследия в условиях развивающихся городских центров и современное состояние данной проблемы требуют наиболее полного освещения и изучения подобных примеров из опыта практической реставрационной деятельности.

Список литературы

1. Багрова, Н.В. Особенности современной интерпретации средового подхода в архитектуре / Н.В. Багрова, М.А. Кушечкова // Ползуновский вестник. – 2014. – №1. – С. 22–56.
2. Ватулина, О.В. К проблеме реконструкции сложившейся городской среды / О.В. Ватулина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия «Социальные науки». – 2008. – №1 (9). – С.28–33.
3. Дом ученых – связь времен // Поиск-НН. – №12 – 1 (198-199). – С. 28–29.

References

1. Bagrova, N.V. Features of modern interpretation of the environmental approach in architecture / N.V. Bagrova, M.A. Kushenkova // Polzunovskii Bulletin. – 2014. – №1. – P. 22–26.
2. Vatulina, O.V. To the problem of reconstruction of the existing urban environment / O.V. Vatulina // Bulletin of Nizhny Novgorod University of N.I. Lobachevsky. Series «Social Sciences». – 2008. – №1 (9). – P. 28–33.
3. House of Scientists as the link of times // Search-NN. – №12 – 1 (198-199). – P. 28 – 29.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 656.13.072:338

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Домке Эдуард Райнгольдович,
кандидат технических наук,
профессор кафедры «Организация
и безопасность движения»

Жесткова Светлана Анатольевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Организация
и безопасность движения»

Акимова Валентина Юрьевна,
доцент кафедры «Организация
и безопасность движения»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Domke Edward Raingol'dovich,
Candidate of Sciences,
Professor of the department «Organization
and traffic safety»

Zhestkova Svetlana Anatolievna,
Candidate of technical Sciences,
Associate Professor of the department
«Organization and traffic safety»

Akimova Valentina Yurievna,
Associate Professor of the department
«Organization and traffic safety»

ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ГРУЗОВ

Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, В.Ю. Акимова

Рассматривается логистический подход к организации перевозок. Показывается возможность минимизации общих затрат в цепи «снабжение – сбыт строительных материалов» (наряду с полным и своевременным удовлетворением спроса). Предлагается метод комплексного решения перевозок с учетом интересов строительных организаций и перевозчиков.

Ключевые слова: организация перевозок, строительные грузы, логистический подход, минимизация затрат, граф

LOGISTIC APPROACH TO THE ORGANIZATION OF CONSTRUCTION MATERIALS TRANSPORTATION

E.R. Domke, S.A. Zhestkova, V.Yu. Akimova

Logistic approach to the organization of transportation is discussed. Minimization of the total cost in the chain «supply-sales» of construction materials (along with full and timely satisfaction of demand) is shown. A method of comprehensive solution to the transportation interests of construction companies and carriers is proposed.

Keywords: transportation, construction materials, logistic approach, cost minimization, graph

Введение

В последние годы в хозяйственную практику предприятий стали активно внедряться новые методы и технологии доставки массовых грузов. Сложность и динамичность современной сбытовой деятельности предполагает решение многих проблем, связанных с взаимодействием ее элементов с внешней средой, а также с режимами функционирования элементов материального и функционального содержания соответствующей деятельности. Все это относится к организации перевозочного процесса массовых грузов [1–4].

Одним из распространенных массовых строительных грузов является кирпич.

Перевозка кирпича осуществляется в основном автомобильным транспортом, так как пункты его потребления находятся на небольших расстояниях от заводов – производителей кирпича.

Экспериментальные исследования, проведенные на кирпичном заводе, расположенном в г. Пензе, показали, что в 58 % случаев разовая вывозка кирпича одним автомобилем осуществляется с последовательной доставкой на две строительные площадки. Пункты доставки устанавливаются диспетчером по заявке, поступающей от застройщиков.

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

При организации перевозочного процесса большое значение имеет время доставки строительного материала. Сокращение продолжительности перевозочного процесса и его этапов может быть настолько велико, что ориентация на экономию времени становится приоритетным направлением всего транспортного процесса [1].

Постановка задачи

Авторами статьи был проанализирован процесс доставки кирпича с Пензенского кирпичного завода на строительные площадки по следующим показателям:

- продолжительность заезда автомобиля на пункт погрузки, $t^{3П}$, мин;
- продолжительность загрузки автомобиля кирпичом, $t^П$, мин/т;
- техническая скорость автомобиля при движении вне населенного пункта, V_1 , км/ч;
- техническая скорость автомобиля при движении в населенном пункте, V_2 км/ч;
- время, затрачиваемое на заезд автомобиля в пункт разгрузки, $t^{3Р}$, мин;
- время, затрачиваемое на разгрузку автомобиля, $t^Р$, мин/т;

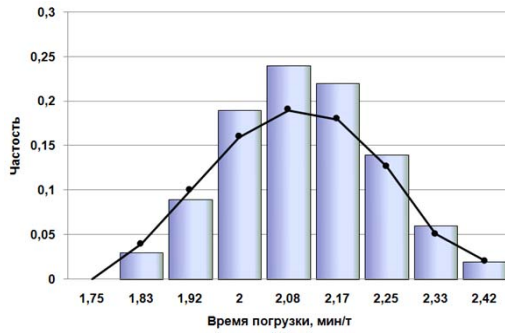
Статистическую обработку указанных параметров выполняли с использованием метода прямого счета. Результаты статистической обработки сравнивали с законом нормального распределения (рис. 1).

Статистические характеристики рассмотренных величин приведены в табл.1. Приведенные гистограммы распределения рассматриваемых характеристик описываются законом нормального распределения.

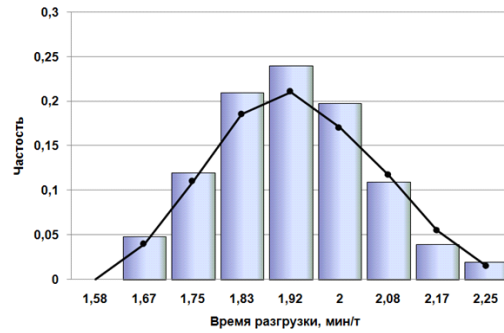
Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики $t^{3П}$, $t^П$, $t^{3Р}$, $t^Р$, V_1 , V_2

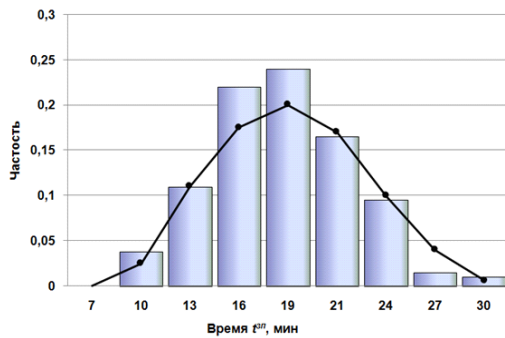
Время погрузки $t^П$, мин/т	$M(t^П) = 2,034$	$\sigma(t^П) = 10,46$	$X^2(t^П) = 5,15$
Время разгрузки $t^Р$, мин/т	$M(t^Р) = 1,83$	$\sigma(t^Р) = 9,58$	$X^2(t^Р) = 4,18$
Время заезда в пункт погрузки $t^{3П}$, мин	$M(t^{3П}) = 18$	$\sigma(t^{3П}) = 12,06$	$X^2(t^{3П}) = 4,78$
Время заезда в пункт разгрузки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



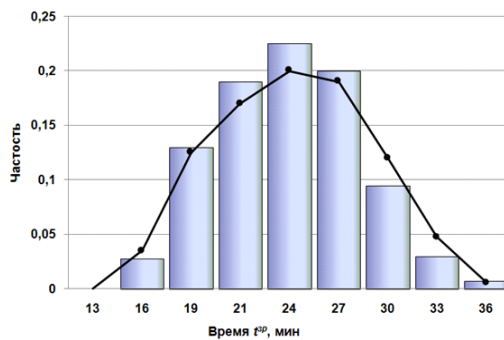
а) График распределения величины t^n



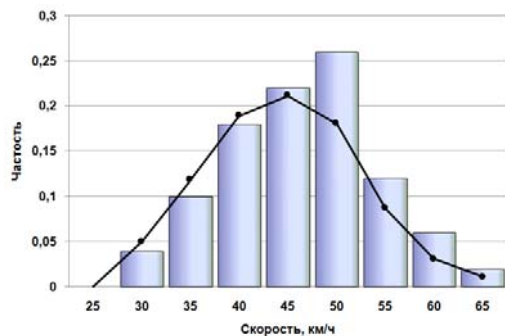
б) График распределения времени t^p



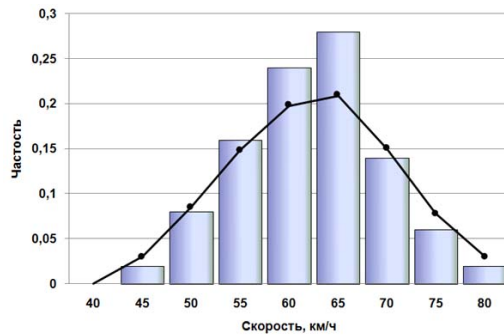
в) График распределения времени t^{3n}



г) График распределения времени t^{3p}



д) График распределения технической скорости V_t в населенном пункте.



е) График распределения технической скорости V_t вне населенного пункта.

Рис. 1. Сравнение гистограмм распределения с законом нормального распределения

Применение логистических принципов при доставке массового груза позволяет сократить общую продолжительность процесса доставки и обеспечивает полное удовлетворение потребностей застройщиков, как по количеству, так и по качеству.

Для расчета транспортной работы, выполняемой автомобилями при перевозке кирпича, устанавливались:

Q_{ij} – масса кирпича, перевезенного i -м автомобилем по j -му маршруту;

t_{ij} – время нахождения i -го автомобиля на j -м маршруте;

$\sum l_j^{ГЕ}$ – суммарная длина грузовых звеньев на j -м маршруте;

$\sum l_j^X$ – суммарная длина холостых пробегов на j -м маршруте;

l_j – длина j -го маршрута;

q – масса кирпича, доставляемого j -м маршрутом на каждую строительную площадку;

$t_{ij}^{\text{ПРО}}$ – время простоя автомобиля.

По этим исходным данным были определены:

- 1) транспортная работа, выполненная на j -м маршруте:

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

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

- 2) выработка i -го автомобиля на j -м маршруте:

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

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

- 3) коэффициент грузового пробега на j -м маршруте:

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

Были исследованы маршруты доставки груза до строительных площадок, используемые кирпичным заводом. За основу взята работа одной смены грузового транспорта. В основу планирования задания положен принцип, чтобы статистический коэффициент грузоподъемности автомобиля был близок к единице. Было выявлено, что перевозка осуществляется по шести маршрутам на восемь строительных площадок.

На рис. 2 приведен транспортный граф зоны обслуживания восьми строительных площадок (2, 5, 26, 59, 60, 94, 96, 105) кирпичным заводом (К) в течение суток. В основу функционирования рассмотренной комбинированной схемы передвижения положен принцип дискретной транспортной работы [2–4].

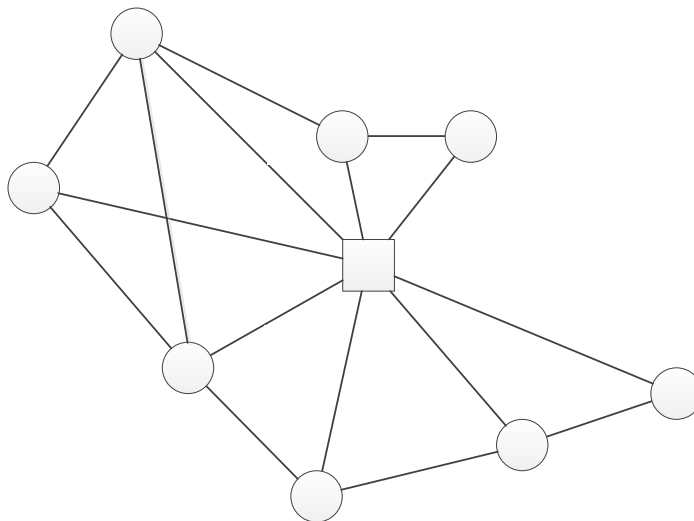


Рис. 2. Транспортный граф зоны обслуживания кирпичным заводом

В табл. 2 представлены существующие показатели транспортного процесса.

Анализ полученных параметров транспортного процесса показал, что он не является оптимальным. Это объясняется прежде всего тем, что логист диспетчерской службы работает, опираясь на собственный опыт, без достаточного обоснования принимаемых решений.

Т а б л и ц а 2

Существующие показатели транспортного процесса

№ партии	№ маршрута	№ стр. пл.	q , т	Q , т	l , км	t , ч	l^x , км	l^e , км	β	P , т·км	U , т/ч	W , т·км/ч
1	1	60	29,5	29,5	80	3,94	40	40	0,5	1180	7,49	299
	2	2	13,8	29,5	244	7,10	117	127	0,52	3305	4,15	465
		105	15,7									
2	3	26	11,8	11,8	188	4,62	94	94	0,5	1109	2,55	240
	4	94	11,9	11,9	228	5,30	114	114	0,5	1357	2,24	256
3	5	5	11,9	23,8	10	2,89	5	5	0,5	115,2	8,23	39,9
		59	11,9									
	6	96	23,8	23,8	314	7,51	157	157	0,5	3737	3,17	498
Итого				130,3	1064	31,36	527	537	0,5	10803	4,15	344

Следовательно, необходимо совершенствовать технологическую схему доставки кирпича на стройплощадки.

Усовершенствованный метод развозки строительных грузов

Предлагаемый метод усовершенствованного транспортного процесса предполагает, что порядок объезда строительных площадок по маршрутам, начиная с кирпичного завода, будет осуществляться на основе использования метода линейного программирования.

Авторами разработана компьютерная программа, позволяющая находить оптимальные маршруты движения на заданной сети [4–6].

В качестве целевой функции можно использовать длину или время пути. Программа позволяет осуществить перебор всех возможных вариантов маршрутов в соответствии с разработанным алгоритмом. Если в процессе расчета получается несколько маршрутов, имеющих одинаковое минимальное значение целевой функции, то она выбирает оптимальный маршрут с наименьшей транспортной работой.

Укрупненная схема модели расчета включает восемь этапов:

1. Создание массива потребителей продукции помашинной отправки строительных грузов. По указанию диспетчера определяются и обозначаются пункты транспортной сети, в которых производится полная выгрузка строительных грузов.

2. Формирование массива кластеров из одного или двух потребителей продукции. Находятся все возможные сочетания пар пунктов, образующие кластер со статическим коэффициентом грузоподъемности, близким к единице.

3. Создание массива сочетаний кластерных пар. Формируются все возможные сочетания кластеров для создания заданного количества маршрутов.

4. Формирование массива кластерных графов. Устанавливаются наименьшие расстояния между выбранной парой потребителей на каждом маршруте и от них до завода.

5. Создание массива из кластерных фиктивных графов. Вводится фиктивный внешний узел между смежными пунктами потребителей на маршруте. Действительная дуга между ними удаляется. Расстояние между фиктивным и действительным узлами принимается равным половине длины удаленной хорды.

6. Составление массива матриц весов. Для каждого фиктивного кластерного графа разрабатывается матрица весов.

7. Определение рациональных маршрутов. Производится расчет матрицы весов каждого кластерного фиктивного графа, и находится рациональный маршрут передвижения в нем.

8. Нахождение оптимального маршрута. Путем сравнения всех рациональных маршрутов по длине определяется оптимальный. При равенстве длин критерием оптимальности служит наименьшая транспортная работа [6].

Проведя расчеты, получим рациональный порядок объезда всех пунктов маршрута и характеристику технико-эксплуатационных показателей, полученных в результате совершенствования маршрутов (табл. 3).

В результате совершенствования маршрутных схем перевозок кирпича получены 5 маршрутов, на которых будут работать два автомобиля грузоподъемностью 30т и три автомобиля грузоподъемностью 24 т. Это позволит увеличить коэффициент использованного пробега, уменьшить холостой пробег подвижного состава и, как следствие, снизить транспортно-экономические издержки.

Т а б л и ц а 3

Показатели предлагаемого транспортного процесса

№ партии	№ маршрута	№ стр. пл.	q , т	Q , т	l , км	t , ч	l^x , км	l^e , км	β	P , т·км	U , т/ч	W , т·км/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	60	29,5	29,5	80	3,94	40	40	0,5	1180	7,49	299
		2	13,8	29,5	244	7,10	117	127	0,52	3305	4,15	465
		105	15,7									
2	3	26	11,8	23,8	323	3,30	114	209	0,64	3605	7,21	1092
		94	11,9									
3	4	5	11,9	23,8	10	2,89	5	5	0,5	115,2	8,23	39,9
		59	11,9									
	5	96	23,8	23,8	314	7,51	157	157	0,5	3737	3,17	498
Итого				130,4	971	24,74	433	538	0,6	11942	5,27	430

ВЫВОДЫ

1. Представлены пути повышения эффективности доставки строительных материалов как задача линейного программирования.

2. Предложен алгоритм информационного обеспечения, позволяющий получить точное решение задачи маршрутизации транспорта.

3. Применение логистических принципов при доставке строительного груза позволяет сократить общую продолжительность процесса доставки и обеспечить удовлетворение потребностей застройщиков.

Список литературы

1. Домке, Э.Р. Особенности решения задачи маршрутизации транспорта методом ветвей и границ / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, В.Ю. Акимов // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2012. – № 2. – С. 76–79.

2. Домке, Э.Р. Использование фиктивных узлов для определения оптимальной комбинации маршрутов с совместным центром / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова С.Ф. Подшивалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 2 – С. 81–92.

3. Жесткова, С.А. Использование метода «ветвей и границ» при решении задач маршрутизации транспорта / С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – № 1. – С. 94–101.

4. Домке, Э.Р. Повышение эффективности развозки нефтепродуктов автомобильным транспортом / Э.Р. Домке, С.А.Жесткова, С.Ф. Подшивалов // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2012. – № 3. – С. 70–74.

5. Домке, Э.Р. Особенности модели функционирования интегрированной системы развозки грузов / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – № 3. – С. 94–99.

6. Домке, Э.Р. Системный подход к моделированию процесса управления транспортировкой нефтепродуктов в смешанных перевозках / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: материалы IV международной научно-производственной конференции. – Пенза: ПГСХА, 2011. – С. 58–62.

References

1. Domke, E. R. Features of the solution of the vehicle routing problem by the method of branches and borders / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, V.Y. Akimova // Bulletin of the Moscow automobile and road Institute (state technical University). – 2012. – № 2. – P. 76–79.

2. Domke, E.R. Use of dummy nodes to determine the optimal combination of routes with the joint center / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, S.F. Podshivalova // news of higher educational institutions. Povolzhskiy region. Technical Sciences. – 2011. – No. 2 – P. 81–92.

3. Zhestkova, S.A. Using the method of «branches and boundaries» in solving vehicle routing problem / S.A. Zhestkova // World of transport and technological machines. – 2012. – No. 1. – P. 94–101.

4. Domke, E.R. Improving the efficiency of distribution of petroleum products by motor transport / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, S.F. Podshivalova // Bulletin of the Moscow automobile and road Institute (state technical University). – 2012. – № 3. – P. 70–74.

5. Domke, E.R. the model of functioning of an integrated system of conveying goods // E.R. Domke, S.A. Zhestkova // World of transport and technological machines. – 2012. – No. 3. – P. 94–99.

6. Domke, E.R. Systematic approach to the modeling of the transportation management process of petroleum products in multimodal transport / E.R. Domke, S.A. Zhestkova // Perspective directions of development of motor transport complex: materials of IV international scientific-production conference. – Penza: PGSKHA, 2011. – P. 58–62.

УДК 378.1: 004.9

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

ЭЛЕКТРОННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ ОТКРЫТОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Л.А. Васин

Показана возможность построения электронной информационной образовательной среды на основе открытого свободно распространяемого программного обеспечения (в частности, Linux) и использования отечественных операционных систем. Приведен пример реализации данного подхода в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства.

Ключевые слова: образовательная среда, открытое образование, программное обеспечение, сетевые информационные службы, интеграция

ELECTRONIC INFORMATION EDUCATIONAL ENVIRONMENT BASED ON OPEN SOURCE SOFTWARE FOR TRAINING SPECIALISTS IN THE FIELD OF CONSTRUCTION.

L.A. Vasin

The possibility of building electronic information educational environment based on open source free software (in Costesti, Linux) and the use of domestic operating systems are shown. An example of this approach realization in Penza state university of architecture and construction is given.

Keywords: educational environment, open education, software, network information services, integration

Введение

Современные требования к качеству образования способствуют расширению возможностей традиционного образования за счет использования цифрового информационного пространства. Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) обязывают образовательные учреждения создавать собственную электронно-информационную образовательную среду (ЭИОС), которая способствовала бы освоению образовательных программ. ЭИОС предназначена для обеспечения информационной открытости вуза в соответствии с требованиями действующего законодательства Российской Федерации в сфере образования, а также для информационного обеспечения и повышения эффективности образовательного процесса при реализации образовательных программ. Среда формирует образовательное информационное пространство учебного заведения, в котором находится электронный образовательный контент, организует к нему доступ учащихся и преподавателей, обеспечивает совре-

менными средствами коммуникаций, а также хранит результаты образовательного процесса. Поэтому можно сделать вывод, что ЭИОС является важной составляющей образовательного процесса современного вуза.

ЭИОС представляет собой совокупность программно-аппаратных компонент, средств вычислительной техники, телекоммуникационных технологий, информационных ресурсов образовательного характера, а также методического обеспечения и ориентирована на обеспечение потребностей участников образовательного процесса в информационно-образовательном контенте.

В соответствии с ФГОСЗ+ ЭИОС организации должна обеспечивать:

- 1) доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем (ЭБС) и электронным информационным образовательным ресурсам (ЭИОР), указанным в рабочих программах;
- 2) доступ ко всем ЭИОР, указанным в рабочих программах, из любой точки, в которой имеется доступ к сети Интернет;
- 3) фиксацию хода образовательного процесса с доступом к ней из личного кабинета студента и преподавателя;
- 4) проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением электронного образования (ЭО) и дистанционных образовательных технологий (ДОТ);
- 5) формирование электронного портфолио обучающегося, в том числе сохранение работ обучающегося, рецензий и оценок на эти работы со стороны любых участников образовательного процесса;
- 6) взаимодействие между участниками образовательного процесса, в том числе синхронное и (или) асинхронное, посредством компьютерной сети «Интернет»;
- 7) удаленный доступ обучающегося к современным профессиональным базам данных, электронным библиотечным системам (ЭБС) и информационным справочным системам (ИСС), указанным в рабочих программах дисциплин;
- 8) доступ обучающихся с ограниченными возможностями здоровья к ЭИОС в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Такие требования позволяют расширить границы образовательного процесса на виртуальную среду, в которой обучающие и преподаватели продолжают образовательный процесс вне зависимости от месторасположения и временных рамок; кроме этого, появляется возможность гибкого подхода к контролю знаний и успеваемости со стороны преподавателя. ЭИОС предоставляет преимущества в виде минимизации временных затрат на вспомогательные операции, не связанные с самим образовательным процессом, такие, как встречи с преподавателем для консультаций, поиск учебных материалов, ознакомление с рабочими программами по направлениям подготовки и т.д. Кроме этого, развитие цифровых персональных устройств (цифровые гаджеты) и широкополосного высокоскоростного цифрового мобильного доступа к всемирной компьютерной сети Интернет, позволило обеспечить неограниченный доступ к информационному пространству вне зависимости от месторасположения.

Основная часть

Построение ЭОИС в вузе должно быть таким, чтобы были учтены законодательные требования и обеспечены технические условия, необходимые для функционирования современных образовательных информационных технологий, имелась возможность расширения информационных возможностей ЭИОС, а также обеспечивалась информационная защита информационного контента и пользовательских данных. Также необходимо учитывать масштабируемость ЭИОС, безопасность, надежность, удобства управления пользователями, а также стоимость программных компонентов используемых при технической реализации, что особенно актуально для государственных бюджетных организаций.

Функциональный состав современной ЭИОС ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» подразделяется на следующие системные компоненты:

- 1) электронные информационные образовательные ресурсы:
 - информационный контент сайта pguas.ru;
 - база данных библиотечной платформы library.pguas.ru;
 - база данных системы электронных курсов do.pguas.ru платформы Moodle;
 - личный кабинет студента и преподавателя lk.pguas.ru;
- 2) средства доступа к информационные образовательные ресурсы:
 - официальный сайт pguas.ru, выполненный на платформе Joomla;
 - система электронных курсов, реализуемая платформой Moodle;
- 3) телекоммуникационные системы:
 - проводной и беспроводной сегмент компьютерной сети университета, реализованный с применением технологии VLAN стандарта IEEE 802.1Q;
- 4) системы телекоммуникационного общения:
 - платформа видеоконференций Openmeetitng;
 - система электронной почты mail.pguas.ru.

Техническая реализация ЭИОС возможна двумя способами: использование коммерческих платформ, таких, как 1С:Университет, Тандем Университет, Галактика Управление вузом, либо на основе открытого и бесплатного программного обеспечения разработанного под лицензией GNU. Особенностью такого построения ЭИОС в ПГУАС является полный отказ от коммерческого программного обеспечения на основе ОС Windows в качестве серверных решений и использование открытого программного обеспечения на основе программной платформы Linux, что позволяет исключить финансовые затраты на приобретение программного обеспечения и техническую поддержку, обеспечить информационную надежность и защищенность. Особенностью ОС Linux является высокая отказоустойчивость, надежность, открытость исходных кодов, а также устойчивость к несанкционированному доступу, к компьютерным вирусам и кибернетическим атакам, что делает данную ОС идеальным выбором для технического развертывания ЭИОС вуза. Кроме того, для ОС Linux существует большое количество открытого и доступного для использования программного обеспечения, что позволяет осуществить техническую реализацию ЭИОС на этой платформе и выполнить все требования нормативных документов. В частности, существуют платформы для электронных курсов, средства управления образовательным процессом, облачные системы взаимодействия между пользователями (облачный сервис), платформы электронных библиотек, системы авторизации и управления пользователями, системы межсетевого взаимодействия (электронная почта и видеоконференции) [1].

Особенно удобно использовать данную ОС для управления и контроля сетевым трафиком пользователей в ЭИОС. Можно реализовать единое сетевое пространство с проводным и беспроводным доступом пользователей к информационным ресурсам и с защитой сетевого трафика всех типов с помощью открытых реализаций систем DPI (проверки и фильтрации сетевых пакетов по их содержанию) и IPS (обнаружение вторжения).

В состав ОС Linux входит межсетевой экран, который позволяет реализовать функции брандмауэра, что крайне важно для маршрутизации сетевого трафика и обеспечивает доступ удаленных и локальных пользователей к ЭИОС и её защиту от сетевых атак, несанкционированного доступа и сетевых вирусов на серверах приложения, которые реализуют функционирование ЭИОС.

Расширенные сетевые возможности позволяют организовать удаленный доступ с помощью технологии VPN, которая позволяет обеспечить пользователей ЭИОС безопасным каналом доступа к внутренним информационным ресурсам вуза из сети Интернет. Использование технологии прозрачного прокси-сервиса, который входит в базовый комплект ОС Linux, позволяет контролировать доступ пользователей к сети

Интернет и значительно упрощает управление настройкой компьютеров пользователей.

Структура ЭИОС ПГУАС показана на рис. 1. Основу ЭИОС ПГУАС составляет сетевой сервис сервера каталога. Он позволяет упорядочить хранение объектов ЭИОС, таких, как подразделения университета, данные преподавателей и студентов. Данный сервис выступает в роли единого центра хранения данных о пользователях и группах, в которые они зарегистрированы. Группы формируются исходя из принадлежности пользователей к структурным подразделениям. Все используемые в ЭИОС информационные сервисы подключены к данному сервису, что позволяет избежать многократного дублирования базы пользователей и значительно упростить процесс администрирования пользователей в ЭИОС.

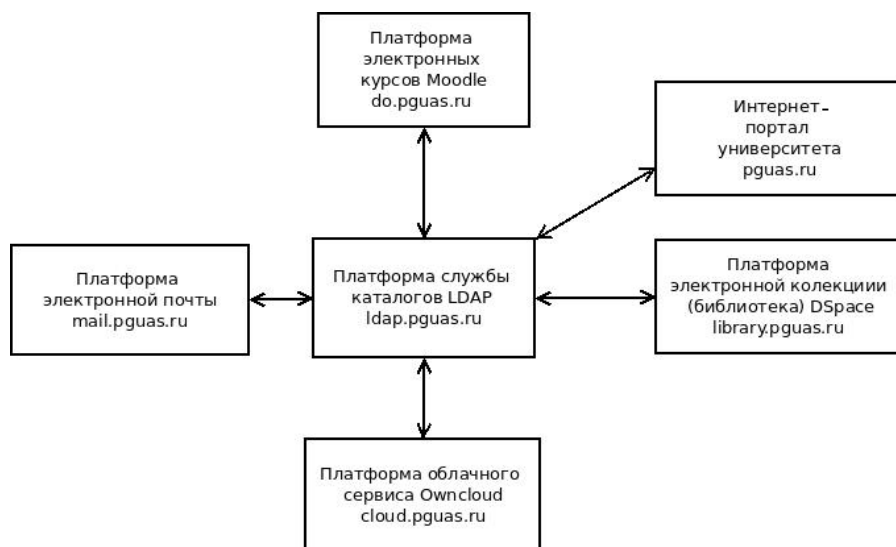


Рис. 1. Структурная организация ЭИОС ПГУАС

Подключение информационных сервисов производится с помощью открытой реализации сервера каталога OpenLDAP под различные платформы ОС Linux. Иерархическая структура сервера каталога ПГУАС показана на рис. 2. В ней отражена вся организационная структура университета, названия подразделений, названия и номера студенческих групп, имя пользователя, его логин и пароль. Каталог представляет собой специализированную базу данных иерархической структуры, состоящей из объектов (данных), расположенных на различных уровнях. Такая база данных является оптимальной для быстрого поиска информации с последующим её выводом. Кроме этого, серверы каталогов используются тандемом (основной и резервный) для организации репликации между ними. Это повышает надежность хранения информации. В ЭОИС ПГУАС используются два сервера каталога, реализованные на основе открытого программного обеспечения OpenLDAP.

Структура объектов группы студентов ЭТИМК-11 показана на рис. 3. Дерево объектов каталога выполнено в виде иерархической структуры, отражающей организационную структуру ПГУАС.

Основной Интернет-портал университета реализован на платформе Joomla. Это открытая и бесплатная платформа создания Интернет-сайтов различной сложности. На рис. 4 показана главная страница Интернет-сайта. Он позволяет оперативно информировать пользователей ЭИОС о последних новостях университета, содержит обязательный раздел «Сведения об образовательной организации», который структурирован согласно нормативным документам Министерства образования и науки РФ и рекомендациям Рособнадзора.

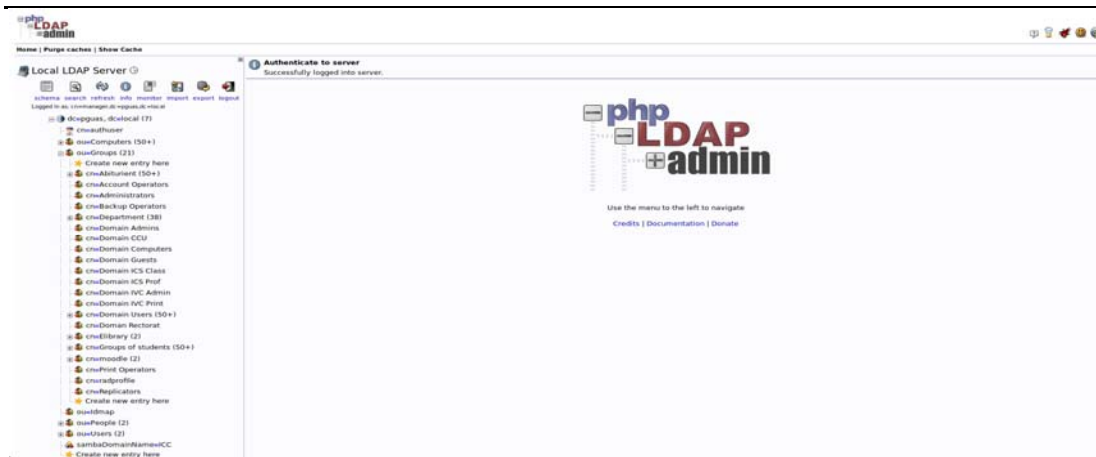


Рис. 2. Иерархическая структура сервера каталога ПГУАС

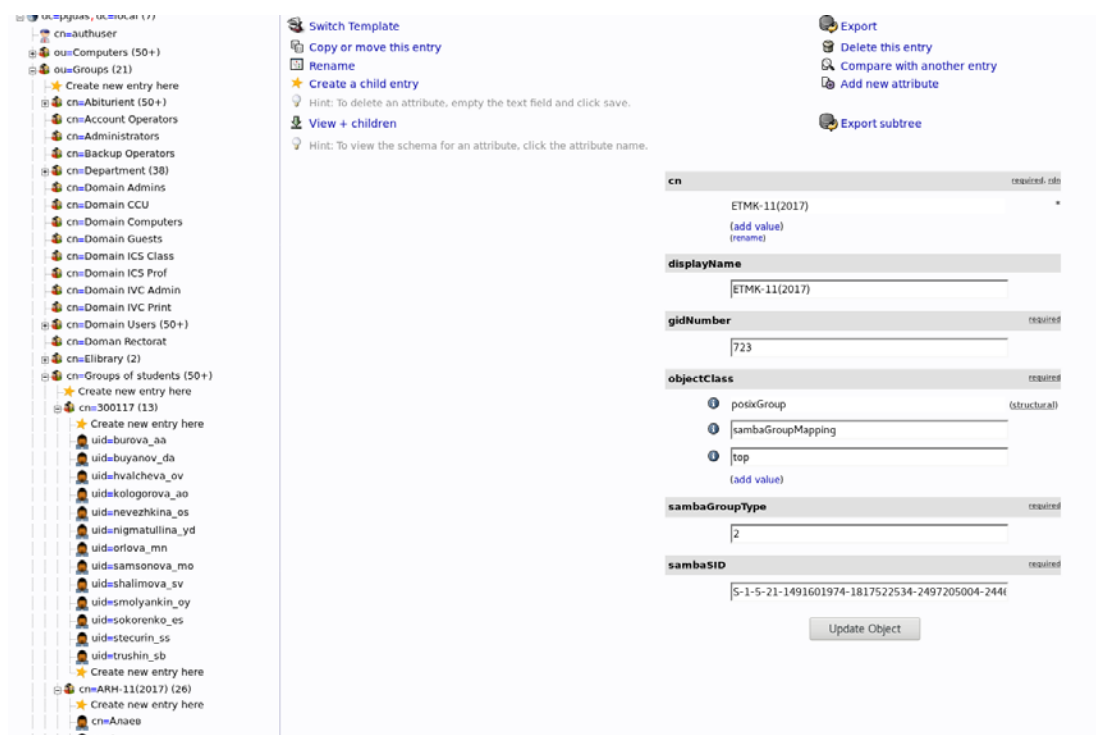


Рис. 3. Структура объектов группы студентов ЭТИМК-11

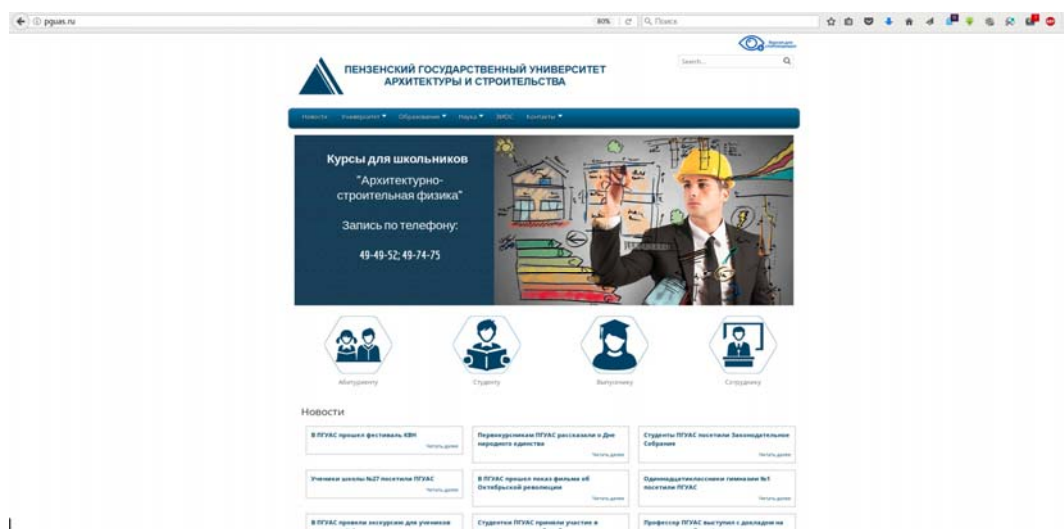


Рис. 4. Главная страница Интернет-сайта ПГУАС

На сайте существует специальный раздел «ЭИОС» (рис. 5), позволяющий осуществлять навигацию по функционирующим компонентам и ресурсам ЭИОС ПГУАС, что значительно упрощает работу пользователей в среде.

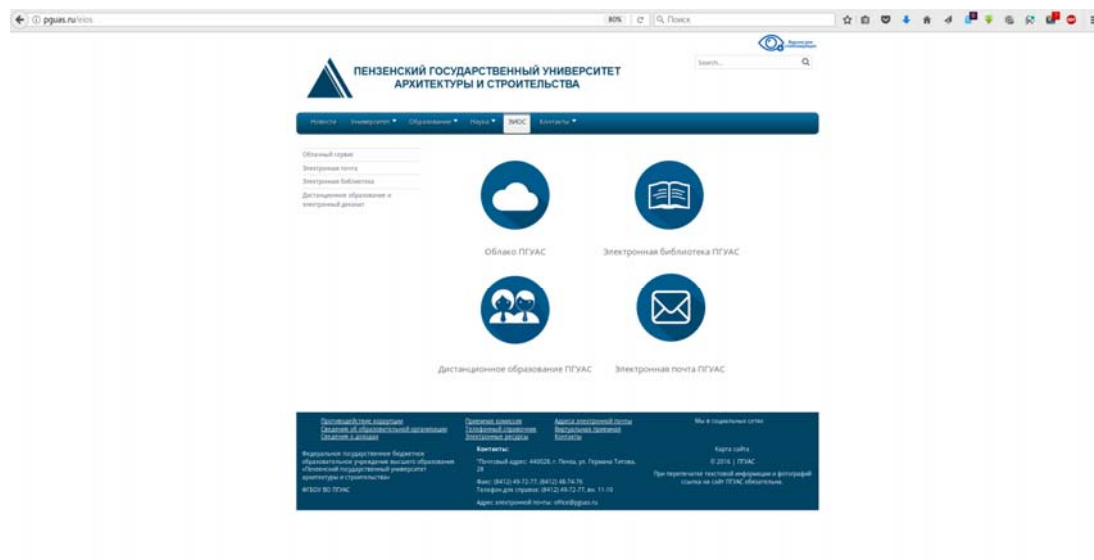


Рис. 5. Раздел «ЭИОС» Интернет-портала ПГУАС

Система электронных курсов реализована на основе платформы Moodle. Это открытая программная платформа управления электронными курсами, представляющая Web-среду, предназначенную для создания Интернет-сайтов для онлайн-обучения. Открытость исходного кода позволяет настраивать систему под требования конкретного учебного процесса в университете. Такая платформа позволяет создавать курсы по направлениям подготовки, размещать в рамках курса учебные материалы в любом формате, включая мультимедийные (аудио и видео). В рамках курсов можно организовывать среду интерактивного общения, применяя для этого электронную учебную доску и видеоконференцию. Система позволяет создавать эффективную систему контроля знаний на основе опросов, тестов с различной степени сложности, что дает возможность точно и объективно провести оценку знаний. Курсы могут быть разделены по направлениям подготовки, учебным группам.

Система Moodle – основа для электронного обучения в ПГУАС, которая является легко расширяемой средой, с возможностью добавления элементов электронного образования. Мультимедийные и интерактивные возможности позволяют совершенствовать образовательный процесс путем увеличения количества доступных студентам образовательных материалов. Это позволяет лучше освоить необходимые компетенции и, в конечном счете, завершить основную образовательную программу [3].

На рис. 6 показана структурная организация системы электронных курсов ПГУАС.

Платформа Moodle является базовой частью при организации информационного взаимодействия между участниками образовательного процесса, как того требует ФГОС 3+. В частности, для этого используется программный модуль «Электронный деканат», который расширяет функции платформы Moodle и дает возможность управлять образовательным процессом и оперировать её объектами, такими, как группа, студент, преподаватель, учебный план, семестр, расписание, текущие оценки, журнал успеваемости и посещаемости, зачетная книжка. Это добавляет новые средства к информационному взаимодействию посредством видеоконференций и электронной почты [2, 3].

Платформа электронной библиотеки в ЭОИС ПГУАС реализована на основе программного средства Dspace [4]. Это открытая платформа для организации свободного доступа к полнотекстовым изданиям и публикациям университета. Основу электронной библиотеки составляют учебные пособия и методические издания в формате PDF, выпущенные издательством ПГУАС. Входящие в состав платформы

поисковые механизмы позволяют осуществлять поиск по названию, по автору, по дате публикации и её тематике. Кроме этого, в ней существуют средства управления публикациями.

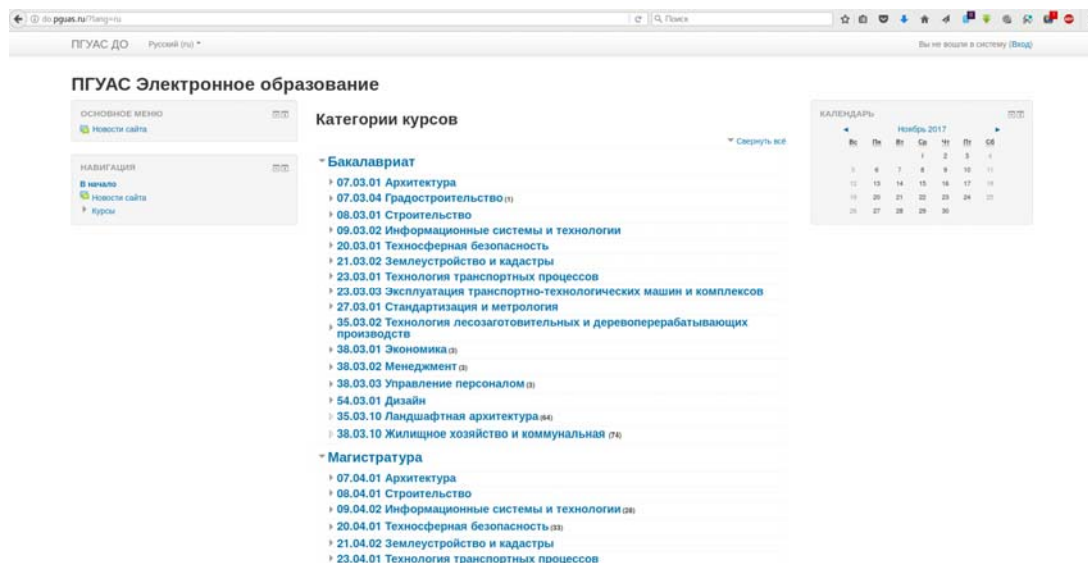


Рис. 6. Структура электронных курсов ПГУАС

Платформа DSpace позволяет осуществлять хранение файлов (например текстовых или мультимедийных) любых форматов. Для их просмотра используются средства Интернет-браузера, а также прикладное программное обеспечение используемой операционной системы. На рис. 7 показана главная страница архива электронной библиотеки ЭИОС ПГУАС.

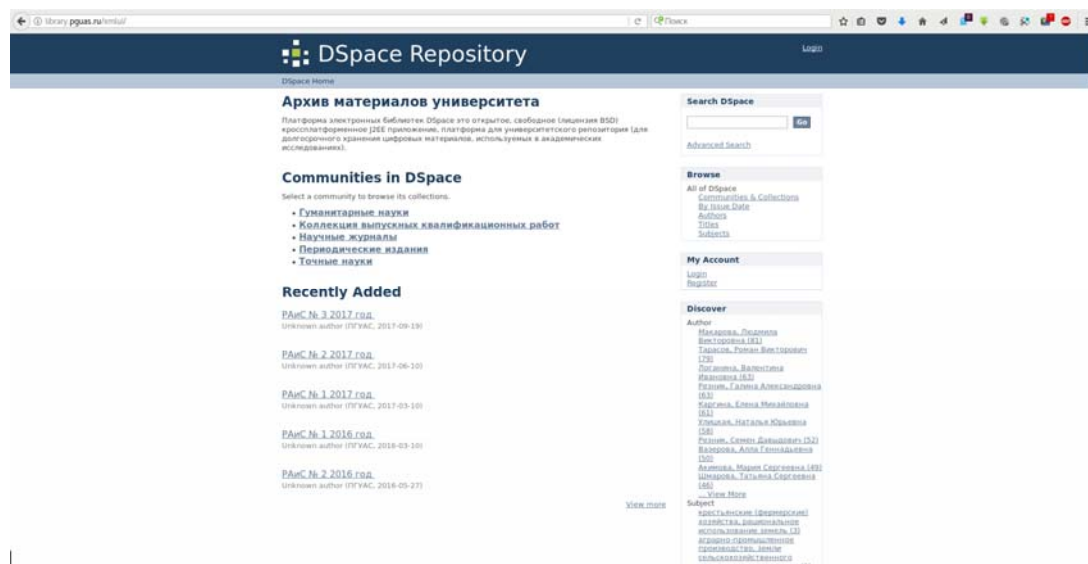


Рис. 7. Электронная библиотека ПГУАС

Для обмена файлами в среде ЭИОС используется платформа облачного сервиса OwnCloud. Это открытая программная платформа обеспечивает возможность хранить файлы и получать доступ к ним с любого устройства, в том числе мобильного [5]. Каждое подразделение и пользователь обеспечиваются личным пространством облачного сервиса, что позволяет организовать коллективную работу с файлами. Созданы специальные каталоги для обмена файлами между подразделениями, например: «От учебно-методического отдела для кафедр», «От деканатов для кафедр». На

рис. 8 показана файловая структура, используемая кафедрой «Информационно-вычислительные системы».

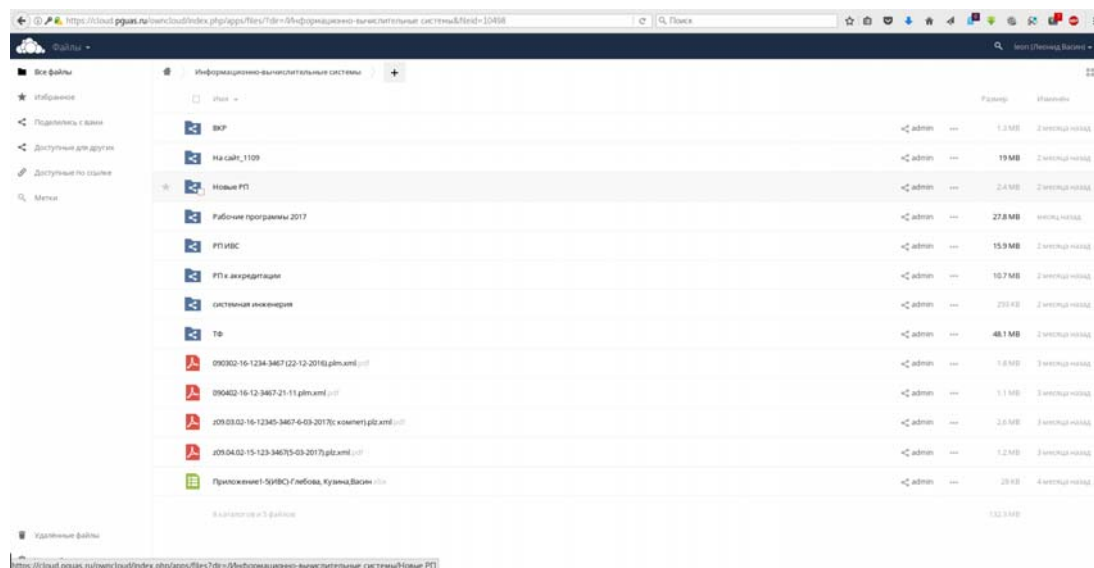


Рис. 8. Файловая структура каталогов кафедры «ИВС»

Интеграция облачного сервиса Owncloud и OpenLDAP позволяет оперативно управлять доступом пользователей к различным каталогам, создавая тем самым структуру облачного хранилища ЭИОС ПГУАС любой сложности и иерархии в рамках организационной структуры университета.

Выводы

1. Продемонстрирована возможность реализации полнофункциональной ЭИОС на основе современной концепции открытого программного обеспечения.
2. Показана возможность обеспечения надежности и информационной безопасности при использовании в качестве основной операционной системы ОС Linux.
3. Показано, что реализация электронной информационной образовательной среды с использованием сервера OpenLDAP позволяет расширить возможность создания новых информационных сервисов.
4. Изложенный подход реализован при построении электронной образовательной среды в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства.

Список литературы

1. Unix и Linux. Руководство системного администратора / Эви Неме, Гарт Снайдер, Тренд Р.Хейн, Б.н Уэйли. – Изд-во «Вильямс», 2014. – 1312 с.
2. Андреев, А.В. Практика электронного обучения с использованием Moodle / А.В. Андреев, С.В. Андреева, И.Б. Доценко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 146 с.
3. Анисимов, А.М. Работа в системе дистанционного обучения Moodle / А.М. Анисимов. – 2-е изд. испр. и доп. – Харьков: ХНАГХ, 2009. – 292 с.
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/DSpace>
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

References

1. Unix and Linux. System administrator's guide / Evi Nema, Garth Snyder, Trend R. Hein, B.n. Whaley. – Ed «Williams», 2014. – 1312 p.
2. Andreev, A.V. Practice of e-learning using Moodle / A.V. Andreev, S.V. Andreeva, I. B. Dotsenko. – Taganrog: Publishing house TRTU, 2008. – 146 p.
3. Anisimov, A.M. Work in system of remote training Moodle / A.M. Anisimov. – 2-e Izd., rev. and more. – Kharkov: KSAME, 2009. – 292 p.
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/DSpace>
5. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

УДК 378.1: 004.9

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

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

ИНТЕГРАЦИЯ СЕРВЕРА КАТАЛОГА С СЕТЕВЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СЛУЖБАМИ СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Л.А. Васин

Рассматривается способ реализации межсервисного информационного взаимодействия в компьютерной сети университета на основе открытой реализации службы каталога OpenLDAP. Показано, что применение службы каталогов позволяет обеспечить хранение информационных объектов в структурированном виде с последующим их использованием в процессе функционирования различных информационных сервисов. Такой подход дает возможность организовать базовый компонент информационной среды как строго структурированную систему с непосредственной интеграцией в различные информационные и сетевые службы информационный системы.

Ключевые слова: информационная система, компьютерная сеть, сетевое взаимодействие, иерархическая структура

INTEGRATION OF THE DIRECTORY SERVER WITH NETWORK INFORMATION SERVICES UNIVERSITY OF CONSTRUCTION

L.A. Vasin

The way of implementation of inter-service information interaction in the university computer network is considered on the basis of the open implementation of the OpenLDAP directory service. The use of the directory service makes it possible to store information objects in a structured form with their subsequent use in the process of operation of various information services. This approach allows us to organize the basic component of the information environment as a strictly structured system with direct integration into various information and network services of the information system.

Keywords: information system, computer network, network interaction, hierarchical structure

Введение

В настоящее время современная информационная система (ИС) состоит из совокупности информационных сервисных служб и ресурсов, базирующихся на основе сети передачи данных модели TCP/IP. Развитие ИС приводит к появлению большого количества сетевых параметров и информационных ресурсов, которые взаимодействуют с пользовательскими аккаунтами посредством сетевых служб. Увеличение количества пользователей ставит задачу наличия актуальной базы пользователей для каждой информационной службы. Поэтому возникает задача организации сетевой службы для управления, хранения и выдачи информационным сервисам данных о пользователях, а также о сетевых параметрах. Кроме этого, необходимо осуществлять

контроль сетевого доступа пользователей и их авторизацию в информационной системе.

Для решения таких задач разработана технология, получившая название служба каталога [1]. Она создавалась как средство сетевого доступа к каталогу имен, узлов, адресов и почтовых ящиков, которые были представлены в стандарте X.400. На его основе был создан стандарт X.500, позволяющий организовать сетевой доступ к централизованной службе каталогов с возможностью хранения данных обо всех именованных объектах сети (ресурсах, приложениях и пользователях) в модели TCP/IP [1].

Основной смысл использования сервера каталога — создание иерархической структуры для обеспечения максимальной производительности при поиске и отдачи результата запроса чтения о данных пользователей или компьютера. Такая скорость обусловлена статичностью изменения данных. Все элементы каталогов имеют свое значение и имя, которое располагается строго на своем месте в иерархической структуре организации. Существует возможность создания собственных схем для решения собственной задачи.

LDAP использует клиент-серверную модель. Один или несколько серверов LDAP содержат информацию, образующую информационное дерево каталога (directory information tree). Клиент подключается к серверу и делает запрос. В ответ сервер отправляет результаты обработки запроса и/или указатель на то, где клиент может получить дополнительные сведения (обычно на другой сервер LDAP). Независимо от того, к какому серверу LDAP подключается клиент, он увидит одинаковое представление каталога; на записи, расположенные на одном сервере LDAP, будут указывать правильные ссылки при обращении к другому серверу LDAP, и наоборот. Это важная особенность глобальной службы каталогов.

Для использования в составе стека протоколов TCP/IP используется протокол LDAP в варианте открытой реализации OpenLDAP [1].

Основная часть

В информационной системе университета создана единая сетевая служба на платформе ОС CentOS 6 Linux с использованием открытой программной реализации OpenLDAP 2.4. Особенность использования версии 2.4 заключается в поддержке механизма динамической конфигурации работающего OpenLDAP сервиса. Наличие такой сетевой службы позволяет объединить все информационные сервисные службы единой базой сетевых объектов, которые используются для их работы. Преимуществом такого способа организации аутентификации и авторизации пользователей для сетевых служб является поддержка протокола LDAP, существующая во всех современных сетевых информационных службах; способность серверов каталога масштабироваться горизонтально и организовывать реплицирование по принципу MultiMaster.

Иерархическая структура LDAP основана на использовании понятия «запись». Запись представляет собой совокупность атрибутов, обладающую уникальным именем, которое носит название DN (Distinguished Name). Такое имя является глобальным для дерева каталога и предназначено для указания на нижележащие записи. Каждый атрибут записи имеет свой тип и значение, например о: означает название организации – pguas.

Построен базовый домен информационной системы ПГУАС (рис. 1). Системы записей в домене реализованы иерархически и отражают всю организационную структуру ПГУАС. В корневом уровне указываются наименование организации, а также специальный пользователь (cn=authuser, dc=pguas, dc=local), с помощью которого происходит связь сетевых сервисных служб с сервером каталога OpenLDAP.

```
# LDIF Export for dc=pguas,dc=local
# Server: Local LDAP Server (192.168.1.5)
# Search Scope: sub
# Search Filter: (objectClass=*)
# Total Entries: 4045
#
# Generated by phpldapadmin (http://phpldapadmin.sourceforge.net) on November 9, 2017 3:44 pm
# Version: 1.2.3

version: 1

# Entry 1: dc=pguas,dc=local
dn: dc=pguas,dc=local
dc: pguas
o: pguas
objectclass: dcObject
objectclass: organization

# Entry 2: cn=authuser,dc=pguas,dc=local
dn: cn=authuser,dc=pguas,dc=local
cn: authuser
objectclass: simpleSecurityObject
objectclass: organizationalRole
userpassword: {SSHA}*****|
```

Рис. 1. Структура базового домена pguas.local

Для подразделений и пользователей создается корневая запись «Group», которая формирует иерархическую ветвь, где расположены структурированные подразделения группы пользователей. На рис. 2 показана запись `cn=ICC, cn=Department, ou=Groups, dc=pguas, dc=local`, принадлежащая группе «Информационно-вычислительный центр». Группа имеет номер `gidnumber: 564`, и в нее входят пользователи, имена которых указаны в записях `memberuid`.

```
# Entry 415: cn=ICC,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=local
dn: cn=ICC,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=local
cn: ICC
displayname:: 0JjQktCm
gidnumber: 564
memberuid: knw
memberuid: chili
memberuid: kofeika
memberuid: lena_daniskina
memberuid: doctorleo
memberuid: leon
memberuid: leo
objectclass: posixGroup
objectclass: sambaGroupMapping
objectclass: top
sambagrouptype: 2
sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-2128
```

Рис. 2. Запись и атрибуты сервера каталога ПГУАС для информационно-вычислительного центра

Возможность хранить все эти сведения, а также большое количество другой полезной информации о пользователе вместе с его UNIX-аккаунтом предоставляет стек объектных классов, на вершине которого находится `objectClass=inetOrgPerson`. Он имеет следующие значения:

- `objectclass: inetOrgPerson` — объектный класс (объектный класс `InetOrgPerson` может использоваться для переноса информации из других LDAP-совместимых каталогов. Этот класс является субъектом безопасности и используется при верификации пользователя, ему можно назначать права и разрешения.);
- `objectclass: sambaAccount` — объектный класс (`samba.schema` разрешает аутентификацию пользователя `samba` с помощью `ldap`);

- objectclass: posixAccount— объектный класс (хранения авторизационной информации учётной записи пользователя UNIX);

- objectclass: top;

- sambaacctflags: [U] (U – пользовательский аккаунт, D – учетная запись заблокирована, N – без использования пароля, W – машинная учетная запись) [1].

Кроме объектных классов в записи пользователя имеются следующие атрибуты:

- gidnumber: – номер группы, в которой находится пользователь (численный идентификатор группы. Именно к основной группе, на принадлежность к которой указывает данное поле, относится вторая битовая триада в восьмеричной маске прав доступа пользователя);

- givenname: – имя реального пользователя;

- sambalmpassword:****;

- sambantpassword:****;

- sambaprimarigroupsid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-2128-;

- sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-7058;

- sn: doctorleo;

- uid: doctorleo;

- uidnumber: 3029 (численный идентификатор пользователя как субъекта системы, наделённого теми или иными полномочиями (правами доступа). Разрешения на доступ к объектам системы соотносятся именно с численным идентификатором, а не с именем пользователя, которое служит hash-ключом для поиска UID_NUMBER.);

- userpassword:*****.

На рис. 3 показаны все атрибуты и объектные классы для пользователя с именем doctorleo, который имеет запись uid=doctorleo, cn=ICC, cn=Department, ou=Groups, dc=pguas, dc=local.

Для записи групп пользователей добавляется атрибут memberuid, который позволяет указать принадлежность пользователя к текущей группе. Допускается включение пользователей из других групп. На рис. 4 показан список объектных классов и атрибутов для группы кафедры «Информационно-вычислительные системы».

Студенческие группы находятся в записи cn=Group of students, ou=Groups, dc=pguas, dc=local. Их записи не находятся в иерархии «Department» с целью изоляции студенческих групп от других подразделений. На рис. 5 показан пример записи для студента группы СТР-123.

Кроме пользовательских данных на сервере каталога удобно хранить и информацию о компьютерах, которые подключены в локальную сеть и используют ресурсы файлового сервиса Samba. На рис. 6 показана запись для компьютера acvarius28.

```
# Entry 417: uid=doctorleo,cn=ICC,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=loc...
dn: uid=doctorleo,cn=ICC,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=local
cn: doctorleo
gidnumber: 564
givenname: doctorleo
homedirectory: /home/users/Information and Calculation Center/torleo
objectclass: inetOrgPerson
objectclass: sambaSamAccount
objectclass: posixAccount
objectclass: top
sambaacctflags: [U]
sambalmpassword: C0C564C004548562AAD3B435B51404EE
sambantpassword: 378B426B7E0ADF7268467E7A33D2625B
sambaprimarigroupsid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-2128-
sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-7058
sn: doctorleo
uid: doctorleo
uidnumber: 3029
userpassword: ***
```

Рис. 3. Запись и атрибуты сервера каталога ПГУАС для пользователя doctorleo

```
# Entry 421: cn=ICS,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=local
dn: cn=ICS,cn=Department,ou=Groups,dc=pguas,dc=local
cn: ICS
displayname:: 0JjQvdGE0L7RgNC80LDRhtC40L7QvdC90L4t0LLRi9GH0LjRgdC70LjRgtC10L
vRjNC90YvQtSDRgdC40YHRgtC10LzRiw==
gidnumber: 525
memberuid: chirkina_ma
memberuid: leon
memberuid: tan1952
memberuid: sid8
memberuid: gvozdeva
memberuid: koshev_an
memberuid: sviridova
memberuid: kuvshinova
memberuid: kuzina
memberuid: poddorogin
memberuid: green
objectclass: posixGroup
objectclass: sambaGroupMapping
objectclass: top
sambagrouptype: 2
sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-2050
```

Рис. 4. Запись и атрибуты сервера каталога ПГУАС для кафедры ИВС

```
# Entry 2894: uid=turovskiy_ev,cn=STR-12z,cn=Groups of students,ou=Groups...
dn: uid=turovskiy_ev,cn=STR-12z,cn=Groups of students,ou=Groups,dc=pguas,dc=
local
cn:: 0KLRg9GA0L7QstGB0LrQuNC5
gidnumber: 611
givenname:: 0JUu0JIu
homedirectory: /home/users/STR-12z/ovskiy_ev
objectclass: inetOrgPerson
objectclass: sambaSamAccount
objectclass: posixAccount
objectclass: top
sambaacctflags: [U]
sambalmpassword: 33576535B828DDA31F5EC6AC11D6EE9E
sambantpassword: DC1F05680EB923E348456873482CFACE
sambaprimarigroupsid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-2222-
sambapwdlastset: -1
sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-5954
sn:: 0KLRg9GA0L7QstGB0LrQuNC5
uid: turovskiy_ev
uidnumber: 2477
userpassword: *****|
```

Рис. 5. Запись и атрибуты сервера каталога ПГУАС для студентов группы СТР-12з

```
# Entry 5: uid=aquarius28$,ou=Computers,dc=pguas,dc=local
dn: uid=aquarius28$,ou=Computers,dc=pguas,dc=local
cn: aquarius28$
description: Computer
displayname: AQUARIUS28$
gecos: Computer
gidnumber: 515
homedirectory: /dev/null
loginshell: /bin/false
objectclass: top
objectclass: account
objectclass: posixAccount
objectclass: sambaSamAccount
sambaacctflags: [W ]
sambantpassword: 9DE0CC2DED85B6E7A58EB29A2413F23D
sambapwdlastset: 1373359220
sambasid: S-1-5-21-1491601974-1817522534-2497205004-1062
uid: aquarius28$
uidnumber: 1087
```

Рис. 6. Запись для компьютера acvarius28

Общая структурная схема взаимодействия сервера каталога ПГУАС показана на рис. 7.

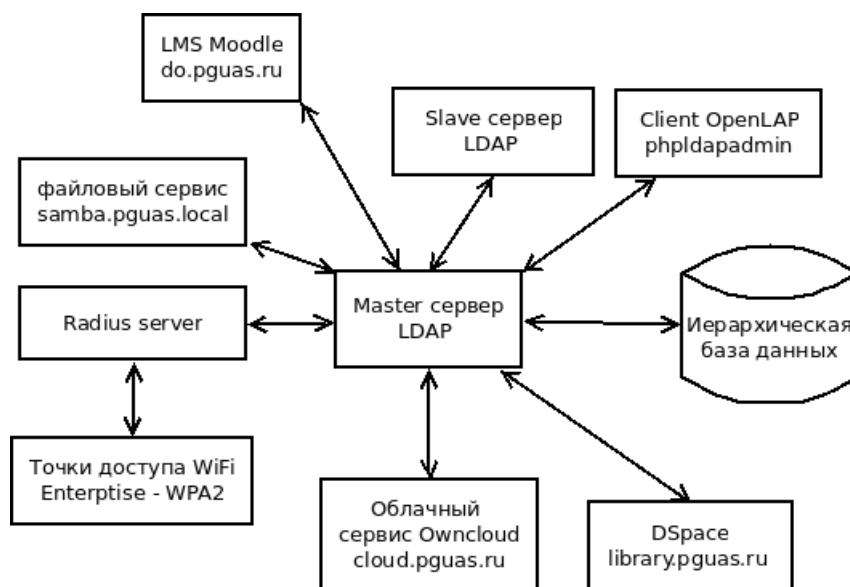


Рис. 7. Структура базового домена pguas.local

Все информационные сервисные службы компьютерной сети университета подключены к серверу каталога, что позволяет избежать многократного дублирования записей о пользователях при развертывании новых информационных сервисов. Подключение сервера электронных курсов Moodle позволяет использовать организационную структуру университета, отраженную в иерархии сервера каталога, что дает возможность организовать электронные курсы по направлениям подготовки, за которыми закреплены кафедры и преподаватели.

На рис. 8 показана конфигурационная административная панель с параметрами подключения к серверу каталога. Обязательно указывается пользователь `sp=authuser` и его пароль, который обеспечивает доступ к структуре. Кроме этого необходимо указывать стандартные сетевые параметры для подключения, такие, как `ip`-адрес сервера, порт сервера каталога, версию LDAP и используемую кодировку [2].

ПГУАС ДО Русский (ru) * Вы вошли под именем Администратор Пользователь (Выход)

ЗАГЛАДИ АДМИНИСТРАТОРА
Добавить в избранное

НАСТРОЙКИ
настройка моего профиля
Администрирование
Личная информация
Регистрация
Расширенные возможности
Пользователи
Курсы
Оценки
Зачеты
Местонахождение
План
Платежи
Обзор платежей
Установка дополнений
Аутентификация
Настройка аутентификации
Сервер LDAP
Ручная регистрация
Ввод записей
Блоки
Вид-сервисы
Журнал событий
Запись на курсы
Инструменты администрирования
Классирование
Личные планы
Модули элементов курса
Отчеты
Поведение вопроса
Способы доставки сообщений

Параметры сервера LDAP

URL сервера:

Версия:

Использовать TLS: ☐

Кодировка LDAP:

Размер страницы:

Параметры подключения

Имя пользователя:

Пароль:

Полное имя:

Настройки поиска пользователей

Тип пользователя:

Контейнер:

Поиск в дочерних контейнерах: ☐

Учитывать поддомены: ☐

Укажите сервер LDAP в формате URL, например 'ldap://ldap.mysite.com' или 'ldaps://ldap.mysite.com'. Для обеспечения бесперебойной работы можно указать несколько серверов, разделяя их знаком «;».

Версия протокола LDAP, которая используется на Вашем сервере.

Использовать службу LDAP (порт 389) с шифрованием TLS

Укажите кодировку, используемую сервером LDAP. Наиболее вероятно, что это «UTF-8». В Microsoft Active Directory v2 по умолчанию используется такая кодировка как cp1250, cp1251 и т.п.

Убедитесь, что это значение меньше, чем предельный размер результирующего набора сервера LDAP (максимальное количество записей, которые могут быть возвращены в одном запросе).

Выборите «Да», чтобы предотвратить копирование паролей в базу данных Moodle.

Если для поиска пользователей требуется особый пользователь, укажите здесь его отличительное имя (DN, DistinguishedName). Например: «cn=ldapuser,ou=pguas,dc=org».

Пароль для указанного пользователя

Укажите, каким образом информация о пользователях хранится в LDAP. От этого параметра также зависит, как будет осуществляться создание пользователей и вид с привилегиями паролей.

Список контейнеров, в которых хранятся учетные записи пользователей. Чтобы указать несколько контейнеров, используйте разделитель «;». Например: «ou=users,dc=org;ou=others,dc=org».

Укажите «Да», если необходимо осуществлять поиск пользователей в дочерних контейнерах.

Определим, каким образом поддомены (alias) обрабатываются во время поиска. Выберите одно из следующих значений: «Нет»

Рис. 8. Параметры подключения сервера каталога к серверу электронных курсов Moodle

При использовании сервера каталога совместно с облачным сервисом обеспечивается реализация корпоративной среды обмена файлами различных типов между

подразделениями университета в соответствии с принадлежностью пользователей к их группам [3]. Управление пользователями с помощью сервера каталога снижает временные затраты на организацию системы прав на файлы облачного сервиса при добавлении новых пользователей или изменении полномочий уже существующих. На рис. 9 показана панель настройки параметров LDAP сервера для облачного сервиса Owncloud.

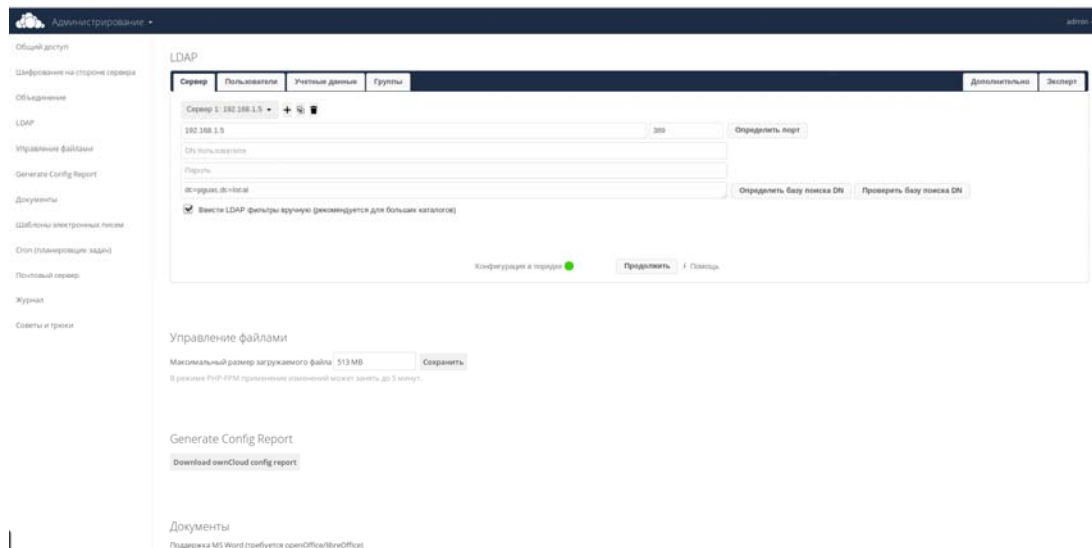


Рис. 9. Панель администрирования подключения сервера каталога LDAP для облачного сервиса Owncloud

Выводы:

1. Приводится иерархическая организация сервера каталога на платформе операционной системы Linux.
2. Показана возможность создания единого центра управления пользователями и сетевыми ресурсами компьютерной сети университета.
3. Показано, что подключение сетевых информационных служб к серверу каталога LDAP обеспечивает интеграцию полномочий пользователей в иерархической структуре университета с сетевыми информационными службами.
4. Практическая реализация сервера каталога выполнена в информационной сети Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

Список литературы

1. Unix и Linux. Руководство системного администратора / Эви Неме, Гарт Снайдер, Тренд Р.Хейн, Б.н Уэйли. – Изд-во «Вильямс», 2014. – 1312 с.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Dspace>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

References

1. Unix and Linux. System administrator's guide / Evi Nema, Garth Snyder, Trend R.Hein, B. n. Whaley. – Ed Williams, 2014. – 1312 p.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Dspace>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

УДК 69.003.13

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

Учаева Татьяна Владимировна,
кандидат экономических наук
доцент кафедры «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Мебадури Зураб Анзоревич,
кандидат экономических наук,
доцент

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Uchaeva Tatiana Vladimirovna,
Candidate of Economics, Associate Professor
of the department «Economics, Organization
and Management»
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Mebaduri Zurab Anzorovich,
Candidate of Economics, Associate Professor

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ КРЕДИТОРСКОЙ ЗАДОЛЖЕННОСТЬЮ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Т.В. Учаева, З.А. Мебадури

Приводятся результаты анализа кредиторской и дебиторской задолженности и ее оборачиваемости. Проведенный анализ выявил недостатки в управлении кредиторской задолженностью в деятельности предприятия, что позволило сформулировать мероприятия, направленные на финансовое оздоровление фирмы.

Ключевые слова: строительное предприятие, кредиторская задолженность, анализ оборачиваемости задолженности, инвентаризация задолженности, факторинг, финансовое оздоровление, эффективное управление задолженностью

DEVELOPMENT OF MEASURES FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF ACCOUNTS PAYABLE OF CONSTRUCTION COMPANIES

T.V. Uchaeva, Z.A. Mebaduri

This article provides the results of the analysis of accounts payable and receivables and the turnover. The analysis revealed shortcomings in the activities of the enterprise for management of accounts payable, which allowed to formulate activities aimed at financial recovery of the company.

Keywords: construction company, payables analysis of receivables turnover, inventory, debt, factoring, financial health, effective management of debt.

Немаловажное место в существовании современного общества занимают долговые валютные обязательства. Проявлением устойчивости предприятия служит его кредитоспособность, т.е. способность развиваться в условиях внутренней и внешней среды. Для этого предприятие должно обладать гибкой структурой финансовых ресурсов и при необходимости иметь возможность привлекать заёмные средства, то есть быть кредитоспособным. Данная статья посвящена кредиторской задолженности, которая является неизбежным следствием существующей в настоящее время системы денежных расчетов между организациями. Как правило, кредиторскую задолженность составляют неоплаченные налоги, неосуществленные платежи поставщикам за отгруженные товары, невыплаченная начисленная заработная плата, невнесенные страховые взносы, неоплаченные долги.

Управление кредиторской задолженностью означает применение предприятием наиболее приемлемых для него форм, сроков, а также объемов расчетов с контрагентом.

тами. Управление кредиторской задолженностью сводится к тому, чтобы дефицит оборотных средств не ослаблял финансовую устойчивость предприятия. Исходя из этого, необходимо проводить анализ кредиторской задолженности и разрабатывать мероприятия по ее сокращению и эффективному управлению.

Был проведен анализ кредиторской задолженности строительного предприятия ООО «РегионСтройКомплект» (г. Пенза). Предприятие осуществляет производство отделочных и завершающих работ; строительство объектов производственного, жилого и социально-культурного назначения; производство и реализацию стройматериалов; оказывает транспортные и складские услуги населению и организациям.

Проведя анализ кредиторской задолженности, можно сделать вывод, что кредиторская задолженность – одна из самых проблемных статей в балансе предприятия. Львиную долю кредиторской задолженности составляет задолженность перед поставщиками и подрядчиками – 94 % в 2014 г., 92,5 % в 2015 г., 91,3 % в 2016 г. Структура кредиторской задолженности представлена на рис. 1.

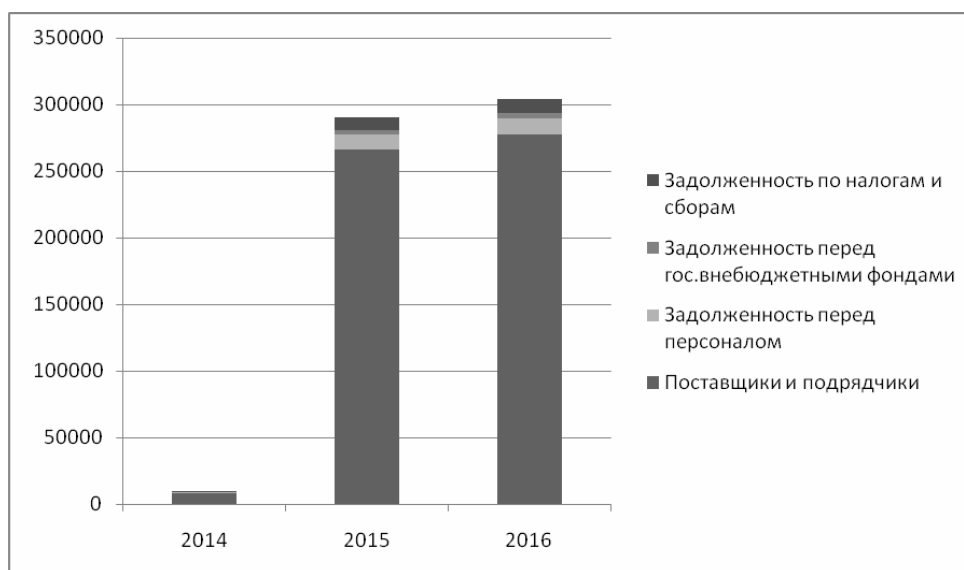


Рис. 1. Динамика структуры кредиторской задолженности за 2014–2016 гг.

Следует отметить, что за анализируемый период темп роста валюты баланса составил 2 030 % (673 982/33 206), а кредиторской задолженности – 3 241 % (303 862/9 376). Таким образом, идет ухудшение финансового состояния предприятия.

Анализ оборачиваемости кредиторской и дебиторской задолженности представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Анализ оборачиваемости кредиторской и дебиторской задолженности
ООО «РегионСтройКомплект» за 2014–2016 гг.

Показатели	2014	2015	2016
Выручка от реализации, тыс.руб.	3 486	3 853	3 499
Себестоимость, тыс.руб.	1 979	2 684	2 633
Кредиторская задолженность, тыс.руб.	637	303	287
Дебиторская задолженность, тыс.руб.	350	618	329
Оборачиваемость в размах			
Кредиторская задолженность	3,11	8,86	9,17
Дебиторская задолженность	9,96	6,24	10,64
Оборачиваемость в днях			
Кредиторская задолженность	173	41,20	39,80
Дебиторская задолженность	36,65	58,49	34,30

Как видно из табл. 1, оборачиваемость кредиторской задолженности повышается (соответственно увеличивается период оборота), а дебиторской задолженности – снижается. Такие изменения обусловлены ростом суммы кредиторской задолженности и снижением дебиторской задолженности.

Для наглядности динамика периода оборота дебиторской и кредиторской задолженности изображена на рис. 2.

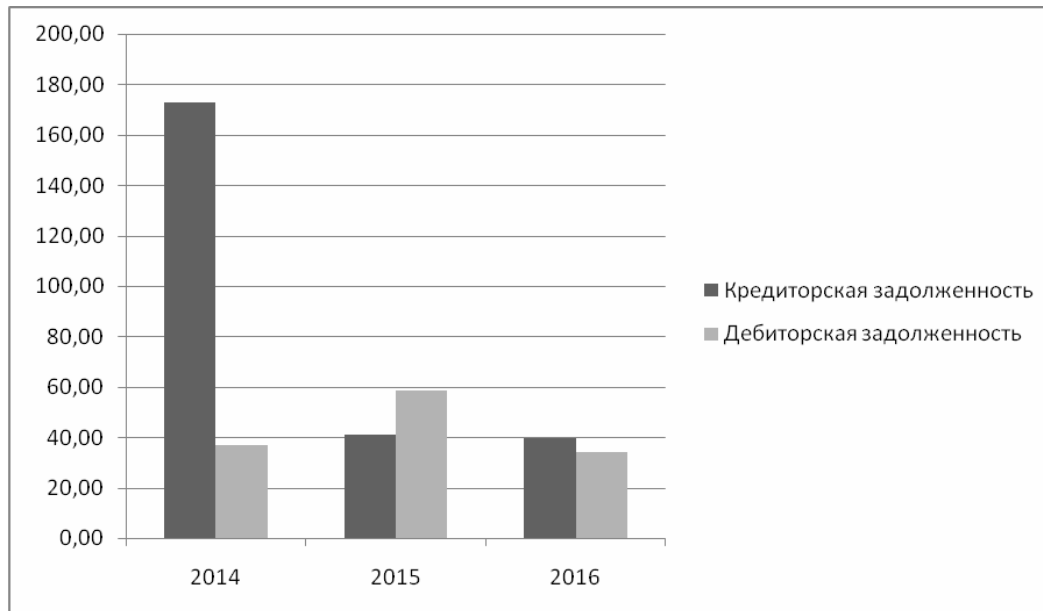


Рис. 2. Динамика периода оборота дебиторской и кредиторской задолженности ООО «РегионСтройКомплект» за 2014–2016 гг.

Анализируя соотношение дебиторской и кредиторской задолженности за весь рассматриваемый период, можно проследить тенденцию роста пассивного сальдо, т.е. кредиторская задолженность превышала дебиторскую. Это свидетельствует о негативных тенденциях в развитии организации.

Таким образом, на основе проведенного предварительного анализа финансовой деятельности ООО «РегионСтройКомплект» можно сделать вывод о неудовлетворительной работе предприятия и росте больных статей за период 2014–2016 годы.

В связи с вышесказанным необходимо разработать мероприятия по снижению кредиторской задолженности и повышению финансовой устойчивости фирмы в целом.

Одним из способов является проведение инвентаризации и продажа имущества. В результате проведения инвентаризации выявлено, что на конец 2016 года у ООО «РегионСтройКомплект» на балансе находилось имущество, представленное в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Имущество ООО «РегионСтройКомплект» на конец 2016 года

Показатели	Стоимость
1	2
Внеоборотные активы	
1.1. ОС и прочие внеоборотные активы	655 841
1.2. Нематериальные активы	-
1.3. Основные средства	-
1.4. Незавершённое строительство	-
1.5. Долгосрочные финансовые вложения	-
Оборотные активы	
2. Оборотные средства	673 982
2.1. Запасы	9 040
2.1.1. Готовая продукция и товары для перепродажи	-

1	2
2.1.2 Расходы будущих периодов	-
2.2. НДС по приобретенным ценностям	-
2.3. Денежные средства и краткосрочные финансовые вложения	1 448
2.4. Дебиторская задолженность	6 182
2.4. НДС по приобретенным ценностям	-
Всего имущества	673 982

ООО «РегионСтройКомплект» реализует имущество по результатам оценки независимых оценщиков (если стоимость имущества предприятия-должника более 100 тыс. рублей, то его должен оценивать независимый оценщик).

В табл. 3 описаны предложения по продаже имущества.

Т а б л и ц а 3

Предложения по продаже имущества ООО «РегионСтройКомплект»

Показатели	Балансовая стоимость	Продажная стоимость
1. Основные средства:	655 841	745 000
– автомобили	50 500	45 000
– офисная мебель	202 706	200 000
– оргтехника	402 635	500 000

При реализации части основных средств (по рыночной стоимости) ООО «РегионСтройКомплект» получает доход в сумме 97 365 рублей.

Дебиторская задолженность является неотъемлемым элементом хозяйственной деятельности любого предприятия, а также одной из основных категорий бухгалтерского учета.

При инвентаризации дебиторской задолженности ООО «РегионСтройКомплект» указываются суммы задолженности (в том числе наличие задолженности государственных и муниципальных унитарных предприятий), размер задолженности, безнадежной к взысканию, и другие значимые факторы.

ООО «РегионСтройКомплект» весьма желательно акцентировать усилия, направленные на скорейшее вовлечение в оборот требований уплаты денег, – дебиторской задолженности. Одной из наиболее эффективных мер в этом контексте является финансирование под уступку денежного требования. Конечно, такое финансирование не будет бесплатным для предприятия-клиента, однако главное достоинство показанного финансового инструмента – выигрыш во времени – целиком компенсирует расходы на него.

Коммерческое значение финансирования под уступку денежного требования (ФУДТ) состоит в том, что ООО «РегионСтройКомплект», не теряя времени (пока дебиторы реально смогут погасить задолженность), получает деньги от финансового агента. ООО «РегионСтройКомплект» вместе с этим получает и выигрыш во времени, добиваясь ускорения оборачиваемости своих средств. А финансовый агент в договоре ФУДТ заинтересован, поскольку ему необходимо вкладывать в дело свой капитал.

Предлагаемые пути финансового оздоровления ООО «РегионСтройКомплект» должны поднять объемы продаж, позволить удовлетворить требования кредиторов, создать привлекательный имидж фирмы в глазах поставщиков и инвесторов, а также покупателей.

Продажа части готовой продукции со скидкой 10 %, а также переуступка прав требования по дебиторской задолженности позволит обеспечить «РегионСтройКомплект» собственными оборотными средствами, рассчитаться с кредиторами и восстановить платежеспособность. Эффективное управление ассортиментом продукции даст возможность увеличить прибыль и поток денежных средств. Ресурсы предприятия

ограничены, следовательно, продавать необходимо только то, что приносит достаточную прибыль и стабильный поток денежных средств.

Предложенная нами программа оздоровления предприятия следующая:

– продажа 90 % готовой продукции. Отметим, что для того чтобы реализовать залежавшийся товар, ООО «РегионСтройКомплект» предпримет маркетинговый ход – установит на 50 % реализуемого товара скидку 10 %. Это позволит привлечь покупателей. Скидка должна будет разрабатываться на определенные товары, которые имеют цены, как у конкурентов. Такой метод стимулирования продаж позволит привлечь покупателей более низкой ценой основных товаров и согласно теории маркетинга повысит уровень продаж сопутствующих товаров;

– дебиторская задолженность ООО «РегионСтройКомплект», как это было отмечено выше, будет реализована по договору факторинга. Причем это мероприятие будет проводиться в комплексе с активной работой в арбитражном суде по взысканию дебиторской задолженности. Рекомендуем ООО «РегионСтройКомплект» реализовать 45 % дебиторской задолженности факторинговой фирме с дисконтом 10 %. Агрессивная политика работы с дебиторами позволит сократить сумму дебиторской задолженности на 90 %. Для этого в первую очередь необходимо составить и разослать письма и претензии дебиторам, отправить иски в суд;

– на балансе ООО «РегионСтройКомплект» имеется существенная часть уплаченного НДС. Анализ кредиторской задолженности показал, что у предприятия имеется задолженность по налогам и сборам (НДС). Программой финансового оздоровления предполагается зачет 144 тыс.руб. задолженности по налогам и сборам;

– несомненно, продажа части готовой продукции со скидкой, а также переуступка прав требования дебиторской задолженности уменьшают выручку, но позволяют извлечь замороженные средства и погасить текущие обязательства. Понесенные убытки (скидки) будут отражены в балансе как непокрытые убытки.

Проведя необходимые расчёты, построим прогнозный баланс с учетом предложенных рекомендаций (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Прогнозный баланс ООО «РегионСтройКомплект»

Актив	2016	прогноз	Пассив	2016	прогноз
			III. Капитал и резервы		
			Уставный капитал	10	10
			Нераспределенная прибыль	7739	7054,01
I. Внеоборотные активы			Итого по разделу III	7749	7064,01
Основные средства	-	-	IV. Долгосрочные обязательства		
Итого по разделу I	655841	655841	Займы и кредиты	-	-
II. Оборотные активы			Итого по разделу IV	-	-
Запасы	9040	904	V. Краткосрочные обязательства		
Расходы будущих периодов	1471	1471	Кредиторская задолженность, в т.ч.	303862	280333,19
Дебиторская задолженность до 12 мес	6182	618,2	поставщики и подрядчики	277426	264411,19
в т.ч. покупатели и заказчики	6182	1236,4	задолженность перед персоналом	12428	12428
Денежные средства	1448	1448	задолженность перед гос внебюджет фондами	3494	3494
Итого по разделу II	18141		задолженность по налогам и сборам, прочие кредиторы	10483	-
			Итого по разделу V	666233	
БАЛАНС	673982		БАЛАНС	673982	

Как видно из табл. 4, валюта баланса сократилась на 36927 тыс.руб. и составила 274684 тыс.руб. Снижение валюты баланса часто рассматривается как негативный факт, однако в рамках финансового оздоровления, если снижение валюты баланса приведет к росту ликвидности и платежеспособности, это снижение можно признать положительным.

Рассмотрим, как изменится структура баланса с учетом предложенных мероприятий (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Изменение структуры баланса в результате предложенных мероприятий

Актив	2016	прогноз	Пассив	2016	прогноз
I. Внеоборотные активы			III. Капитал и резервы		
			Уставный капитал	20,6 %	85,7 %
			Нераспределенная прибыль	-12,8 %	-68,3 %
			Итого по разделу III	7,8 %	17,4 %
Основные средства	0,1 %	0,5 %	IV. Долгосрочные обязательства		0,0 %
Итого по разделу I	0,1 %	0,5 %	Займы и кредиты	6,2 %	25,7 %
II. Оборотные активы			Итого по разделу IV	6,2 %	25,7 %
Запасы	31,5 %	31,1 %	V. Краткосрочные обязательства		0,0 %
Готовая продукция для перепродажи	26,7 %	11,1 %	Займы и кредиты		0,0 %
Расходы будущих периодов	4,8 %	20,0 %	Кредиторская задолженность, в т.ч.	86,0 %	56,9 %
Налог на добавленную стоимость	12,2 %	38,3 %	поставщики и подрядчики	78,5 %	38,2 %
Дебиторская задолженность до 12 мес	54,4 %	22,6 %	задолженность перед персоналом	3,5 %	14,6 %
в т.ч. покупатели и заказчики	54,4 %	22,6 %	задолженность перед гос внебюджет фондами	1,0 %	4,1 %
Денежные средства	1,8 %	7,5 %	задолженность по налогам и сборам, прочие кредиторы	3,0 %	0,0 %
Итого по разделу II	99,9 %	99,5 %	Итого по разделу V	86,0 %	56,9 %
БАЛАНС	100,0%	100,0 %	БАЛАНС	100,0 %	100,0 %

Отметим, что существенно снизилась доля готовой продукции и дебиторской задолженности (снижение по данным статьям – более чем в 2 раза). Анализируя структуру пассивов, отметим увеличение доли капитала и резервов, а также снижение доли кредиторской задолженности поставщикам и подрядчикам.

Для того чтобы оценить, как повлияют предложенные мероприятия на финансовое состояние предприятия, рассчитаем коэффициенты ликвидности ООО «РегионСтройКомплект» с учетом предложенных мероприятий (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Показатели ликвидности ООО «РегионСтройКомплект»
в результате предложенных мероприятий

Коэффициенты ликвидности	Прогноз	2016
Кал	0,13	0,02
Кбл	0,53	0,65
Ктл	1,07	1,02
Кфн	0,17	0,08
Коб	0,17	0,08
Кфнз	0,25	0,16

Как видно из табл. 6, практически все коэффициенты ликвидности увеличились в результате предложенных мероприятий по финансовому оздоровлению. И хотя величины коэффициентов не достигли нормального значения, отметим существенный их рост, что свидетельствует о положительных изменениях в ликвидности и платежеспособности предприятия. (рис. 3).

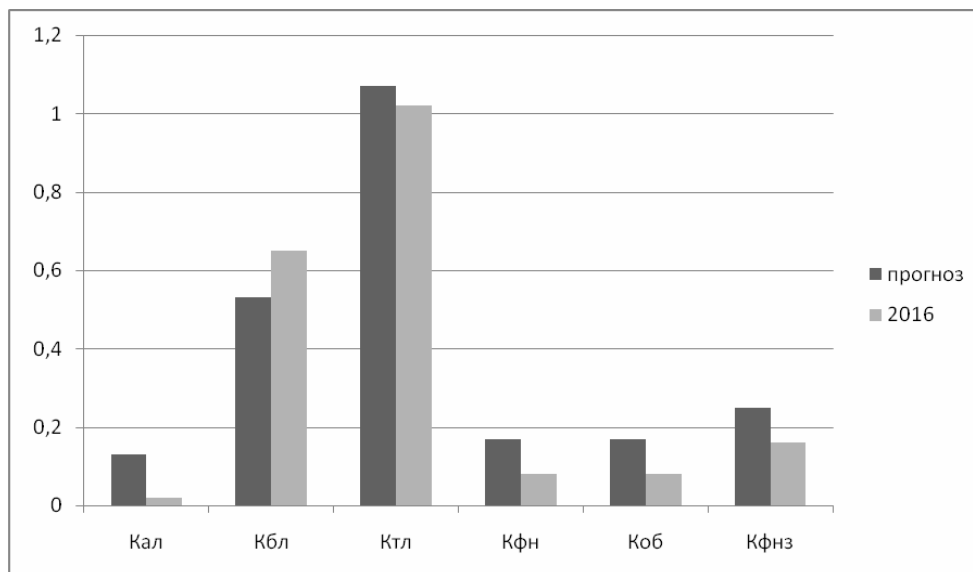


Рис. 3. Изменения показателей ликвидности ООО «РегионСтройКомплект»

Имеется четкая тенденция сокращения кредиторской задолженности и, как следствие, финансового оздоровления предприятия, что позволяет судить об эффективности предложенных мероприятий.

Список литературы

1. Учаева, Т.В. Управление дебиторской и кредиторской задолженностью, как способ повышения финансовой устойчивости предприятия / Т.В. Учаева // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016. – №6–2. – С.104–110.
- 2.Учаева, Т.В. Использование заемных средств как фактор улучшения финансовых результатов предприятия / Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.197.
3. Учаева, Т.В. Повышение финансовых результатов строительного предприятия / Т.В. Учаева, А.Н. Усатенко // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016. – №5. – С.138–143.
4. Учаева, Т.В. Роль финансового анализа в повышении эффективности деятельности строительного предприятия / Т.В. Учаева, Д.С. Иванова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2 (27). – С.161–166.

References

1. Uchaeva, T.V. Management of receivables and payables, as a way to improve the financial stability of the enterprises / T.V. Uchaeva // Education and science in the modern world. Innovations. – 2016. – No. 6-2. – P. 104–110.
2. Uchaeva, T.V. Use of borrowed funds as a factor in the improvement of financial results of an enterprise / T.V. Uchaeva //Regional architecture and engineering. – 2017. – №3. – P. 197.
3. Uchaeva, T.V. Improving the financial results of construction enterprises / T.V. Uchaeva, A.N. Usatenko // Education and science in the modern world. Innovations. – 2016. – No. 5. – P. 138–143.
4. Uchaeva T.V. Role of financial analysis in improving the efficiency of a construction enterprise / T.V. Uchaeva, D.S. Ivanova // Regional architecture and engineering. – 2016. – №2 (27). – P. 161–166.

УДК 331.108.4:378.011.3-052:69

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

Резник Семён Давыдович,
доктор экономических наук, профессор,
зав. кафедрой «Менеджмент»
E-mail: disser@bk.ru

Хазова Яна Сергеевна,
студент
E-mail: Ms.khazova@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

Reznik Semyon Davidovich,
Doctor of Economic Sciences, Professor,
Head of the department «Management»
E-mail: disser@bk.ru

Khazova Jana Sergeevna,
student
E-mail: Ms.khazova@mail.ru

СТУДЕНЧЕСКАЯ КАФЕДРА И ЕЕ РОЛЬ В ПОВЫШЕНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

С.Д. Резник, Я.С. Хазова

Раскрывается роль студенческой кафедры в развитии студенческого самоуправления, личных качеств и повышении профессиональных компетенций студентов строительного университета. Рассматриваются организационные обязанности членов студенческой кафедры «Менеджмент», личные качества студентов в процессе управления самими собой, результаты деятельности студенческой кафедры «Менеджмент».

Ключевые слова: строительный университет, студенты, повышение профессиональных компетенций, студенческая кафедра

STUDENT DEPARTMENT AND ITS ROLE IN THE DEVELOPMENT OF STUDENT SELF-GOVERNMENT, PERSONAL QUALITIES AND PROFESSIONAL COMPETENCES OF STUDENTS OF A CONSTRUCTION UNIVERSITY

S.D. Reznik, J.S. Khazova

The article reveals the role of the student department in the development of student self-government, personal qualities and enhancement of professional competence of students of a construction university. The organizational responsibilities of the members of the student department «Management», the personal qualities of students in the process of self-management, the results of the student department «Management» are considered

Keywords: construction university, students, increase of professional competencies, student department

Чтобы освоить будущую профессиональную деятельность и развить необходимые деловые качества, студентам следует самим активно этому способствовать. Для этого существуют дополнительные курсы, кружки, практики, работа на производстве и др. Но далеко не все студенты используют свои возможности, объясняя это нехваткой времени, финансовых средств, неуверенностью в качестве предоставляемых услуг.

В Институте экономики и менеджмента Пензенского государственного университета архитектуры и строительства в течение ряда лет успешно реализуется проект «Институт студенческих лидеров» (ИСЛ). ИСЛ – это студенческое объединение, помогающее раскрыть и развить у студентов потенциал будущего руководителя, организатора деятельности фирм и их персонала.

ИСЛ – это модель организации, работающей в различных направлениях. Как и любая другая организация, ИСЛ имеет собственную структуру: директор института, деканы факультетов, менеджеры фирм, кураторы в лице заместителей декана института.

В Институте студенческих лидеров активно функционируют шесть факультетов, каждый из которых включает 6-10 фирм. Факультетом руководят студент-декан и его заместитель. Вот перечень факультетов ИСЛ в нашем строительном университете: «Деловое администрирование», «Менеджмент в бизнесе», «Менеджмент в науке», «Менеджмент в журналистике», «Менеджмент в культуре» и «Менеджмент в спорте».

Одной из ключевых студенческих фирм на факультете «Деловое администрирование» является студенческая кафедра «Менеджмент». Деятельность такой студенческой кафедры в течение последних двух лет возглавляла студентка второго курса направления «Менеджмент» Яна Хазова. Численность сотрудников кафедры составляла 6 человек, каждый из которых работал по направлению деятельности одного из заместителей заведующего «взрослой» кафедрой «Менеджмент» (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Состав и структура студенческой кафедры «Менеджмент» (2014–2016 гг.)

№ п/п	Фамилия, имя студента	Должность на кафедре	Группа	Прикрепленный заместитель заведующего кафедрой
1	Хазова Яна	Заведующий студенческой кафедрой «Менеджмент»	Мен-41	Резник С.Д., д.э.н., профессор, заведующий кафедрой «Менеджмент»
2	ВострокнUTOва Ольга	Заместитель заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент»	Мен-42	Черников А.Е., к.э.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по экономической работе
3	Папина Светлана	Заместитель заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент»	Мен-42	Сазыкина О.А., к.э.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по научной работе
4	Кувалдина Ирина	Заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по учебной работе	Мен-42	Джевицкая Е.С., к.э.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по учебной работе
5	Миликова Гузель	Заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по научно-исследовательской работе студентов	Мен-42	Левина С.Ш., к.э.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по научной работе студентов
6	Лошкарева Светлана	Заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по социально-методической работе	Мен-42	Чемезов И.С., к.э.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Менеджмент» по работе со школьниками

В этом составе коллектив студенческой кафедры выполнял самые разнообразные виды работ. Например, для организации встречи выпускников «50 лет со дня окончания Пензенского инженерно-строительного института» студенческая кафедра взяла на себя:

- поиск ветеранов через сеть Интернет;
- оповещение о предстоящей встрече;
- рассылку приглашений;
- подготовку благодарственных писем;
- организацию выставки книг и встречи выпускников;
- рассылку памятных подарков ветеранам университета;
- поздравление ветеранов с наступающим Новым годом.

В конце 2016 года состав студенческой кафедры изменился. Результаты обновления состава студенческой кафедры «Менеджмент» отражены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Обновленный состав студенческой кафедры «Менеджмент» (2016–2017 гг.)

№ п/п	ФИО	Должность на кафедре	Группа
1	Хазова Яна	Заведующий студенческой кафедрой «Менеджмент»	Мен-41
2	Рыбакова Юлия	Первый заместитель заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент», заместитель по научной работе	Мен-21
3	Стрельникова Снежана	Заместитель по учебной работе	УП-21
4	Моисеева Светлана	Заместитель по НИРС (научно-исследовательская работа студентов)	Мен-21
5	Мещеринова Дарья	Заместитель по социальной и воспитательной работе	Мен-21
6	Комракова Наталья	Заместитель по НИРС (научно-исследовательская работа студентов)	Мен-11

Работа студенческой кафедры, как правило, включает два «фронта» – организационный и научно-методический.

Организационные обязанности члена студенческой кафедры включают лаборантскую помощь кафедре по ряду позиций:

- работу с организационной и вычислительной техникой;
- работу с информацией;
- составление документов;
- дежурство на телефоне (прием телефонограмм) и др.;

Организационная помощь кафедре, т.е. работа технического характера, осуществляется под руководством методиста «взрослой» кафедры Терехиной Н.С.,.

Научно-исследовательские и научно-методические обязанности члена студенческой кафедры «Менеджмент» предусматривают:

- взаимодействие с куратором – профильным заместителем заведующего кафедрой (по учебной работе, по научной работе, по социальной и воспитательной работе и др.);
- написание совместно с преподавателем научных статей по результатам исследований.

Вот некоторые итоги деятельности студенческой кафедры, позволившие студентам стать более организованными и лучше подготовленными к управленческой деятельности, усилить свои профессиональные компетенции:

- отвечая на телефонные звонки, студенты научились правильно вести диалог с различными людьми;
- выполняя порученную работу, они стали более исполнительными, учились самоконтролю своей деятельности;
- студенты кафедры приобрели знания техники личной работы: умение пользоваться организационной и вычислительной техникой, различного рода программным обеспечением, работать с информацией, оформлять документы, планировать свои дела, пользоваться записной книжкой, менять занятия, работать с секретарем;
- участники студенческой кафедры интенсивно нарабатывали навыки общения с людьми более высокого должностного положения;
- внимательно наблюдая за тем, как работают профессора и доценты кафедры, студенты осваивали новый для себя уровень общения, повышали свой словарный запас;
- работая в составе «взрослой» кафедры, студенты быстро нарабатывали умение адаптироваться в коллективе и получали гарантии карьерного роста;

- выполняя функции руководителей кафедры, студенты научились делегировать полномочия;
- взаимодействуя со своим преподавателем-куратором, студенты получали разнообразную дополнительную информацию научного характера, необходимую для дальнейшей учебы.

Заключение

Работа на студенческой кафедре помогла студентам повысить свои профессиональные компетенции, учила лучше управлять самим собой. По мнению студентов кафедры, использование опыта создания студенческих кафедр необходимо в каждом вузе. Благодаря этой форме взаимодействия студент получает навыки, необходимые для его дальнейшей работы, ускоряется и облегчается период его адаптации к культурной, организационной и профессиональной среде работы в будущем. Такая форма студенческого самоуправления является хорошей практической базой обучения менеджменту в вузе, положительным образом отражается на личностном и профессиональном развитии студента, что способствует получению новых теоретических знаний. Это подтверждают отзывы студентов-выпускников, внесших немалый вклад в развитие студенческой кафедры.

В целом можно отметить, что такая форма студенческого самоуправления – студенческая кафедра «Менеджмент» Института студенческих лидеров – играет огромную роль в развитии студентов, повышает их деловые, организаторские и просто человеческие качества, которые понадобятся в дальнейшем.

И еще один важный момент. Организация студенческой кафедры, помимо задачи развития студентов, помогает решать проблему лаборантского обслуживания учебного процесса на кафедрах регионального вуза.

И приведем отзывы студентов о результатах своего участия в работе на студенческой кафедре.

Хазова Яна (гр. Мен-41), заведующий студенческой кафедрой «Менеджмент» в 2014 – 2016 гг. (прикрепленный руководитель – д.э.н., профессор Резник С.Д.):

«Поступив на первый курс по направлению «Менеджмент», я не была до конца уверена в том, что выбрала именно то направление, которое мне действительно нужно. Но потом все изменилось. При прохождении летней практики в студенческой дирекции в должности методиста мне приходилось выполнять многие вещи, связанные с организацией работы кафедры. С начала следующего учебного года на должность заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент» Семёну Давыдовичу Резнику порекомендовали мою кандидатуру. Я не была уверена, что справлюсь, но в связи с тем, что мне всегда нравится пробовать что-то новое, я согласилась и ни разу не пожалела о своем решении.

Семен Давыдович вложил душу в развитие каждого студента-сотрудника кафедры. В свою очередь, наш студенческий коллектив очень старался, выполнял все требования. Семен Давыдович многому научил нас, за что мы ему бесконечно благодарны.

В процессе работы в должности заведующего студенческой кафедрой мне удалось получить новые профессиональные компетенции и навыки, развить личные качества. Я стала более исполнительницей, пунктуальной, целенаправленной и организованной».

Папина Светлана (гр. Мен-41), заместитель заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент» по научной работе (прикрепленный руководитель – к.э.н., доцент Сазыкина О.А.):

«Это была не игра во взрослую жизнь. Это была реальная работа в команде. Время, проведенное на кафедре «Менеджмент», разнообразило мою студенческую жизнь.

Работа на кафедре дала мне возможность быть частью команды, которая состояла не только из моих одноклассниц, но и из преподавателей кафедры. Это помощь преподавателям и налаживание с ними отношений, когда всегда была возможность пообщаться с нужным преподавателем, задать интересующие вопросы по его дисциплине.

Работа на кафедре – это возможность быть ближе к делам университета, недоступная обычному студенту, шанс помочь в организации крупных мероприятий. Пожалуй, самое незабываемое событие – помощь в организации встречи выпускников нашего университета. Безусловно, работа на студенческой кафедре – это не только шанс зарекомендовать себя как хорошего помощника, но еще и возможность развить свои навыки и способности – лидерские, организаторские или творческие.

Преподавателем, к которому меня прикрепили, стала к.э.н., доцент Ольга Анатольевна Сазыкина, которая впоследствии стала моим дипломным руководителем. Совместно мы написали статью, посвященную теме: «Разработка системы мотивации персонала в соответствии со стратегией развития предприятия (на примере ПАО Ростелеком)».

В процессе работы я также взаимодействовала с методистом кафедры «Менеджмент» – Надеждой Сергеевной Терехиной, которая давала нам различные поручения: работу с документами; набор текстов и печать; работу в архиве, а также мы отвечали на телефонные звонки и помогали другим преподавателям.

Вострокнутова Ольга (гр. Мен-42), заместитель заведующего студенческой кафедрой «Менеджмент» по социальной и воспитательной работе (прикрепленный руководитель – к.э.н., доцент Черницов А.Е.):

«Студенческая кафедра «Менеджмент» стала для меня частью всей моей студенческой жизни. Она помогла мне приобрести такие компетенции, как ответственность, исполнительность, коммуникабельность. Взаимодействие с преподавателями кафедры, работа с документами, ведение телефонных переговоров, помощь в организации встречи сокурсников С.Д. Резника – все это внесло огромный вклад в формирование моих новых компетенций.

За время работы на студенческой кафедре мною совместно с Черницовым А.Е. были опубликованы две статьи: «Предпосылки развития малого бизнеса: анализ факторов формирования предпринимательских способностей», а также «Молодежное предпринимательство как фактор развития экономики России». Перечисленные статьи легли в основу моей выпускной квалификационной работы».

Миликова Гузель (гр. Мен-42), заместитель по научно-исследовательской работе студентов (прикрепленный руководитель – к.э.н., профессор Левина С.Ш.):

«В студенческой кафедре я многое открыла для себя. В первую очередь получила хорошие навыки работы с людьми, узнала, как грамотно оформлять и работать с документами, получила опыт ведения телефонных переговоров. Я охотно выполняла поручения своего прикрепленного преподавателя, поддерживала деловые и дружеские контакты с руководителем. Считаю, что зарекомендовала себя как ответственный и добросовестный работник. Я приобрела опыт, который, уверена, поможет мне в дальнейшем как в работе, так и в жизни.

Кувалдина Ирина (гр. Мен-42), заместитель по учебной работе (прикрепленный руководитель – к.э.н., доцент Джевицкая Е.С.):

«Кафедра «Менеджмент» – это та кафедра, на которой я училась на 4 курсе, и честно могу сказать, без доли сомнений, ни разу не разочаровалась в своем выборе при поступлении в университет. На нашей кафедре работает прекрасный, интересный и высокопрофессиональный преподавательский коллектив. Мы не просто учимся как рядовые студенты, мы живем большой и дружной семьей, заинтересованы в совместных успехах, поддерживаем и помогаем друг другу. Студенты и преподаватели на нашей кафедре не просто коллеги, а добрые друзья. Все преподаватели у нас очень разные и интересные. Наша кафедра сейчас находится на этапе динамического роста, чего я ей желаю и в будущем! Не останавливаться, двигаться только вперед и расширять свои границы».

Лошкарева Светлана (Мен-42), заместитель по методической работе (прикрепленный руководитель – к.э.н., доцент Чемезов И.С.):

«Работа в составе коллектива студенческой кафедры «Менеджмент» дала мне возможность понять, что работа над общим делом сплачивает коллектив, что нужно серьезно подходить к решению проблем, нести ответственность за свои поступки,

быть общительным и разносторонним человеком. Кроме того, мы имели возможность напрямую взаимодействовать со всеми преподавателями кафедры «Менеджмент» в области научной работы, получали от них полезные советы.

Форма студенческого самоуправления «Студенческая кафедра «Менеджмент» играет огромную роль в развитии студентов и организована с целью повышения деловых, организаторских и просто человеческих качеств, которые понадобятся нам в дальнейшем».

Список литературы

1. Организационное поведение / С.Д. Резник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 460 с. – (Высшее образование).
2. Персональный менеджмент / под ред. С.Д. Резника. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 559 с. – (Высшее образование).
3. Социальная устойчивость российского студенчества: Гендерный аспект / С.Д. Резник, М.В. Черниковская // Друкеровский вестник. – 2017. – №3. – С. 33–48.
4. Студент вуза: технологии обучения и профессиональной карьеры / С.Д. Резник, И.А. Игошина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 509 с.
5. Управление внеаудиторной работой студентов: опыт выпускающей кафедры строительного университета / С.Д. Резник, О.В. Холькина // Региональная архитектура и строительства. – 2017. – №2. – С. 190.
6. Управление кафедрой / С.Д. Резник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 387 с.

References

1. Organizational behavior / S.D. Reznik. – 3rd ed., Rev. and extra – M.: INFRA-M, 2012. – 460 p. – (Higher education)
2. Personal management / ed. S.D. Reznik. – 5-e Izd., Rev. – M.: INFRA-M, 2013. – 559 p. – (Higher education).
3. Social sustainability of Russian students: Gender aspect / S.D. Reznik, M.V. Chernikovskaya // Vestnik Kucеровsky. – 2017. – No. 3. – P. 33–48.
4. Student of the University: learning technologies and professional career / S.D. Reznik, I.A. Igoshina. – 3rd ed. Rev. – M.: INFRA-M, 2015. – 509 p.
5. Management of extracurricular work of students: experience of the department of a construction university / S.D. Reznik, O.V. Galkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 2. – P. 190.
6. Managing a Department / S.D. Reznik. – 3rd ed. Rev. and extra – M.: INFRA-M, 2014. – 387 p.

Указатель статей, опубликованных в 2017 г.

1. **Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Аверкин Ю.А.** Столетие *I-d*-диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация. – №4(33). – С.166–172.
2. **Акимова И.В., Титова Е.И.** Информационные и коммуникационные технологии в решении профессионально ориентированных задач с целью усвоения компетенций студентами, обучающимися по направлению подготовки «Строительство». – №1(30). – С.99–105.
3. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев В.А.** Использование реагентов-окислителей в технологиях очистки сточных вод. – №2(31). – С.141–148.
4. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев В.А.** Новая методика гидравлического расчета трубчатых смесительных устройств, работающих в области квадратичного закона сопротивления. – №2(31). – С.132–140.
5. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев В.А., Давыдов Г.П.** Математическое моделирование процесса работы трубчатого гидродинамического смесительного устройства. – №1(30). – С.124–131.
6. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Ласьков Н.Н., Князев В.А.** Оценка эффекта истощения газовой фазы в процессе массопередачи в двухфазных системах жидкость – газ. – №4(33). – С.158–165.
7. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Шеин А.И., Князев В.А.** Новая методика определения рациональных технологических параметров работы трубчатого смесительного устройства. – №3(32). – С.136–142.
8. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Шеин А.И., Князев В.А.** Теоретические основы процесса массопередачи в объеме динамической двухфазной смеси «вода – воздух». – №3(32). – С.152–159.
9. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Шеин А.И., Князев В.А.** Математическая модель определения равновесной концентрации извлекаемых в процессе сорбционной очистки загрязняющих веществ. – №1(30). – С.118–123.
10. **Арискин М.В., Гарькин И.Н.** Условия для использования козлового крана при сейсмических воздействиях. – №3(32). – С.123–127.
11. **Артюшин Д.В., Ласьков Н.Н., Коновалов П.В.** Модели сопротивления срезу суперкоротких железобетонных конструкций. – №4(33). – С.82–89.
12. **Бакушев С.В.** Оценка коэффициента поперечной деформации при сферически-симметричном деформировании сплошных сред. – №2(31). – С.72–80.
13. **Бакушев С.В.** Разрешающие уравнения плоской деформации в перемещениях для физически и геометрически нелинейной сплошной среды в цилиндрических координатах. – №4(33). – С.70–77.
14. **Бакушев С.В.** Сферически-симметричные ударные волны в сплошных средах. – №1(30). – С.53–68.
15. **Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Тараканов О.В.** Цемент на основе золы-уноса для современных строительных технологий. – №1(30). – С.5–11.
16. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Наружные ограждающие конструкции для формирования стабильного теплового режима помещений. – №4(33). – С.78–81.
17. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды. – №3(32). – С.99–104.
18. **Береговой А.М., Береговой В.А., Викторова О.Л.** Регулирование процессов тепломассопереноса и воздухообмена в ограждающих конструкциях и зданиях современного типа. – №1(30). – С.69–73.
19. **Береговой А.М., Береговой В.А., Викторова О.Л.** Теплоаккумулирующие свойства энергоактивной стены в системе естественной вентиляции и отопления здания. – №1(30). – С.74–77.

-
20. **Береговой В.А., Егунов Д.А.** Строительная древесина: параметры модифицирования и свойства. – №1(30). – С.25–29.
21. **Береговой В.А., Егунов Д.А., Сорокин Д.С.** Строительные материалы и вяжущие вещества на основе гидролизного лигнина. – №3(32). – С.75–79.
22. **Береговой В.А., Снадин Е.В.** Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций. – №4(33). – С.56–61.
23. **Болдырев С.А., Гарькин И.Н., Медведева Л.М.** Адаптация студентов в строительном вузе: социологический аспект. – №1(30). – С.84–89.
24. **Болдырева О.В.** Метод цифровой обработки образов в определении перемещений железобетонной балки. – №2(31). – С.105–109.
25. **Васин Л.А.** Интеграция сервера каталога с сетевыми информационными службами строительного университета. – №4(33). – С.201–207.
26. **Васин Л.А.** Электронная информационная образовательная среда на основе открытого программного обеспечения для подготовки специалистов в области строительства. – №4(33). – С.193–200.
27. **Вдовин В.М.** Надежность клеёных деревянных рам, эксплуатирующихся длительное время в условиях повышенной агрессии. – №2(31). – С.81–85.
28. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Исследование жесткого карнизного узла мансардной рамы на клеенных стальных шайбах. – №3(32). – С.112–118.
29. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Клеешпоночное соединение деревянных элементов с применением гладких кольцевых шпонок и полимерных композиций. – №2(31). – С.95–99.
30. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Оценка качества и надежности клееных деревянных щитов для пола театральной сцены. – №4(33). – С.102–110.
31. **Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т., Худяков В.А.** Пластично-вязкие свойства модифицированных эпоксидных композитов. – №3(32). – С.5–10.
32. **Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т., Худяков В.А.** Ударная прочность эпоксидных композитов на основе отходов производства. – №1(30). – С.12–16.
33. **Глухов В.С., Глухова М.В.** Оптимизация осадки ленточного свайного фундамента. – №4(33). – С.90–95.
34. **Горбунова В.С., Гринцова О.В.** Номинативно-когнитивный потенциал слово-сочетаний с адьюнктом concrete, используемых в сфере строительства. – №2(31). – С.209–213.
35. **Гришин Б.М., Бикунцова М.В., Ласьков Н.Н., Шеин А.И.** Кинетика коагуляции примесей воды с использованием крупнозернистой контактной загрузки. – №1(30). – С.138–144.
36. **Гришин Б.М., Бикунцова М.В., Шеин А.И., Титов Е.А.** Первичное отстаивание сточных вод, обработанных в преаэраторе с затопленной загрузкой. – №1(30). – С.132–137.
37. **Гучкин И.С., Артюшин Д.В., Ласьков Н.Н., Коновалов П.В.** Причины образования трещин в ростверке и цоколе многоэтажного жилого дома. – №2(31). – С.115–121.
38. **Гучкин И.С., Шишкин С.О., Ласьков Н.Н.** Эффективные способы усиления и регулирования осадки фундаментов колонн каркасных зданий. – №1(30). – С.47–52.
39. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Анализ иерархий в синтезе строительных материалов. – №1(30). – С.36–41.
40. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Идентификация кинетических процессов формирования свойств композитов: случай кратных корней. – №3(32). – С.46–50.
41. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Композиты: графоаналитический метод параметрической идентификации кинетических процессов. – №2(31). – С.45–52.
42. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Метод пробных воздействий при идентификации композиционных материалов. – №4(33). – С.49–55.
43. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Полиномиальные модели при синтезе композитов. – №2(31). – С.37–44.
44. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Строительное материаловедение: комплексные исследования, системный анализ. – №1(30). – С.42–46.

45. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Фундаментализация научных знаний в проектировании композитов. – №3(32). – С.54–58.
46. **Депутатов М.А., Гарькин И.Н., Медведева Л.М.** Реализация молодежной политики в строительном вузе: социологический аспект. – №2(31). – С.122–126.
47. **Димитренко Н.В.** Реорганизация дачных массивов под жилую и общественную застройку (на примере г. Пензы). – №2(31). – С.164–173.
48. **Домке Э.Р., Жесткова С.А., Акимов В.Ю.** Логистический подход к организации перевозки строительных грузов. – №4(33). – С.186–192.
49. **Ерёмкин А.И., Баканова С.В., Кошев А.Н., Родионов Ю.В., Тараканов О.В.** Математическая модель увлажнения текстильного материала. – №4(33). – С.173–179.
50. **Исупов С.А.** Соединения деревянных конструкций на основе нагельных коннекторов. – №2(31). – С.100–104.
51. **Клюка Е.Н., Чурсин А.И.** Усовершенствованная методика расчета железобетонных конструкций при изгибе с кручением. – №2(31). – С.110–114.
52. **Кокшаров А.С.** Градостроительное формирование торгового пространства Кинешмы XVIII–начала XX вв.. – №1(30). – С.173–177.
53. **Кокшаров А.С., Высоцкая В.В.** Архитектура сельских торговых площадей Верхнего Поволжья второй половины XIX – начала XX вв.. – №2(31). – С.181–185.
54. **Комаров В.А., Болдырева О.В.** Прочность сжатых полос бетона консольных опор ригелей с подрезкой. – №3(32). – С.105–111.
55. **Коровкин М.О., Гринцов Д.М.** Повышение эффективности суперпластификаторов в бетонах с низким расходом цемента. – №3(32). – С.84–87.
56. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Степанов С.А.** Организация противодымной вентиляции на подземных автостоянках. – №4(33). – С.142–149.
57. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Степанов С.А., Иващенко Н.Ю., Чапаева С.И.** Гидравлическая увязка двухтрубных систем отопления. – №1(30). – С.159–164.
58. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Тараканов О.В., Иващенко Н.Ю.** Из опыта реконструкции производственной теплогенерирующей установки с использованием котлов на отработанном масле. – №1(30). – С.151–158.
59. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Тараканов О.В.** Особенности проектирования вентиляции пожаробезопасных зон. – №4(33). – С.150–157.
60. **Кочеткова М.В.** Расчётные модели ростверков под колонны. – №1(30). – С.106–112.
61. **Кошев А.Н., Варенцов В.К.** Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов. – №3(32). – С.128–135.
62. **Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л.** Неорганические термостойкие адгезивы. – №3(32). – С.21–28.
63. **Кузин Н.Я., Ежова Н.А.** Саморегулируемые организации в строительстве: состояние и перспективы. – №1(30). – С.95–98.
64. **Кузина В.В., Кошев А.Н.** Математическое моделирование процессов переноса пассивной примеси в ограниченном пространстве. – №4(33). – С.133–141.
65. **Кузина В.В., Кошев А.Н., Кошев Н.А.** Вычислительный эксперимент при решении обратных задач по определению концентраций металлов в водных растворах электролитов. – №1(30). – С.145–150.
66. **Кучеренко М.Н., Сизенко О.А., Лелонд О.В., Бикунтова М.В., Ежов Е.Г.** Разработка режимной карты работы систем вентиляции в многоквартирных жилых домах. – №3(32). – С.160–164.
67. **Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Абсиметов М.В., Когут Е.В.** К вопросу получения высокопрочного газобетона. – №3(32). – С.11–20.
68. **Лесовик В.С., Попов Д.Ю.** Повышение эффективности текстиль-бетона. – №4(33). – С.10–16.
69. **Ликомаскина М.А., Алнаиф М.С., Миронов А.А., Сальникова А.И.** Исследование влияния минеральных порошков различного химико-минералогического состава на свойства асфальтобетонных смесей. – №2(31). – С.53–63.

70. **Логанина В.И., Жегера К.В.** Оценка морозостойкости плиточного клея на цементной основе с применением в рецептуре добавки на основе аморфных алюмосиликатов. – №2(31). – С.32–36.
71. **Логанина В.И., Кислицына С.Н., Демьянова В.С., Мажитов Е.Б.** Свойства модифицированного связующего для силикатных красок. – №4(33). – С.17–24.
72. **Логанина В.И., Кислицына С.Н., Мажитов Е.Б.** Разработка рецептуры золь-силикатной краски. – №3(32). – С.51–53.
73. **Логанина В.И., Фролов М.В.** Оценка экономической эффективности использования теплоизоляционных отделочных составов. – №3(32). – С.80–83.
74. **Логанина В.И., Фролов М.В., Рябов М.А.** Оценка трещиностойкости покрытий на основе теплоизоляционного состава для отделки газобетона. – №1(30). – С.30–35.
75. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Майоркина Т.Н.** Рейтинговая оценка поставщика в рамках создания систем менеджмента качества на предприятиях строительной индустрии. – №2(31). – С.203–208.
76. **Максимова И.Н.** Сопоставление деформаций кратковременной ползучести и работы разрушения. – №3(32). – С.39–45.
77. **Максимова И.Н.** Структурные изменения песчаных бетонов при кратковременном осевом сжатии. – №3(32). – С.29–38.
78. **Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Егина Н.А.** О параметрах механического поведения горных пород с позиций структурной механики разрушения материалов. – №2(31). – С.25–31.
79. **Максимова И.Н., Макридин Н.И.** О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов. – №4(33). – С.30–37.
80. **Максимова И.Н., Макридин Н.И., Королев Е.В.** Взаимосвязь кинетических зависимостей внутреннего трения, модуля упругости и параметров разрушения конструкционной прочности модифицированных суперпластификатором С-3 структур цементных композитов. – №4(33). – С.38–48.
81. **Мигунов В.Н., Шамшина К.В.** Жёсткость и кривизна изгибаемых железобетонных конструкций в жидкой хлоридсодержащей среде (результаты экспериментальных исследований). – №1(30). – С.78–83.
82. **Монастырская М.Е.** Региональная градостроительная идентичность как основа «парадигмальной» интеграции в градообразовании. – №1(30). – С.165–172.
83. **Монахов В.А., Саакян Р.Ю., Урин В.В.** Алгоритм расчёта рамы на устойчивость на основе дискретной модели расщеплённого стержня. – №2(31). – С.86–94.
84. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н.** Подкрановая балка с повышенным техническим ресурсом эксплуатации. – №3(32). – С.119–122.
85. **Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Ежов Е.Г., Грейсх Г.И., Тараканов О.В.** Формирование оптимальной структуры региональной газораспределительной системы снабжения потребителей сжиженным углеводородным газом. – №4(33). – С.116–125.
86. **Павлов М.В., Лукин С.В., Кочкин А.А.** Исследование влияния различных факторов на параметры лучистого отопления теплицы. – №4(33). – С.126–132.
87. **Перелыгин Ю.П., Бикунцова М.В., Ласьков Н.Н., Шейн А.И.** Расчет оптимальных значений водородного показателя при осаждении ионов тяжелых металлов в сточных водах промышленных предприятий. – №4(33). – С.111–115.
88. **Петрянина Л.Н.** Реконструкция жилых зданий опорного городского фонда как направление современного городского строительства. – №3(32). – С.172–176.
89. **Пышкина И.С., Жегера К.В.** Эффективность применения аморфных алюмосиликатов и гидросиликатов кальция в известковых сухих строительных смесях. – №4(33). – С.25–29.
90. **Резник Г.А.** Маркетинг взаимодействия в строительном комплексе: реалии времени. – №1(30). – С.178–184.
91. **Резник С.Д., Вдовина О.А.** Опыт и перспективы педагогической подготовки и повышения квалификации преподавателей в строительном университете. – №3(32). – С.183–190.

92. **Резник С.Д., Хазова Я.С.** Студенческая кафедра и ее роль в повышении профессиональных компетенций студентов строительного университета. – №4(33). – С.215–220.
93. **Резник С.Д., Холькина О.В.** Управление внеаудиторной работой студентов: опыт выпускающей кафедры строительного университета. – №2(31). – С.190–196.
94. **Рыбакова Е.Ю.** Современный Берлин. приближение к модели «европейского города». – №3(32). – С.177–182.
95. **Садырова М.Ю., Шалдыбин С.Г.** Законодательное регулирование градостроительной деятельности. – №2(31). – С.186–189.
96. **Селяев В.П., Бондаренко В.М., Селяев П.В.** Прогнозирование ресурса железобетонных изгибаемых элементов, работающих в агрессивной среде, по первой стадии предельных состояний. – №2(31). – С.13–24.
97. **Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Селяев П.В., Колотушкин А.В.** Химическое сопротивление цементных композитов действию водных растворов, содержащих ионы хлора. – №1(30). – С.17–24.
98. **Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Шабает И.Н.** Генезис трещин в процессе нагружения призм из цементного бетона сжимающей нагрузкой. – №3(32). – С.88–93.
99. **Смирнова Ю.О., Кулаков К.Ю.** Анализ моделей накопления средств на реализацию капитального ремонта. – №1(30). – С.192–198.
100. **Смирнова Ю.О., Логинова В.В.** Влияние энергоэффективных мероприятий на теплотехнические и экономические характеристики многоквартирных жилых домов. – №4(33). – С.96–101.
101. **Снежкина О.В., Киселев А.А.** Определение ширины раскрытия трещин в коротких железобетонных балках. – №1(30). – С.90–94.
102. **Снежкина О.В., Киселев А.А.** Оценка прочности железобетонных балок по экспериментальным данным. – №2(31). – С.127–131.
103. **Соколова Н.В.** Демографический потенциал Пензенской области. – №2(31). – С.155–163.
104. **Солманидина Н.В., Гринцова О.В., Гринцов Д.М.** Устная речь как важнейший компонент коммуникативного обучения иностранному языку в техническом вузе. – №1(30). – С.113–117.
105. **Тараканов О.В., Белякова Е.А.** Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками. – №4(33). – С.62–69.
106. **Усатенко А.Н.** Значение анализа ключевых финансовых показателей для повышения эффективности деятельности строительного предприятия. – №2(31). – С.197–202.
107. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Усуев З.М., Хомутов А.О.** Обоснование применения и разработка газовых фильтров с цилиндрическими фильтрующими элементами предварительной и тонкой очистки, размещаемыми в одном корпусе. – №3(32). – С.165–171.
108. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Усуев З.М., Хомутов А.О.** Разработка принципов устройства и применения быстросъемных крышек с непрерывным контролем их герметичности, устанавливаемых в газовых фильтрах газорегуляторных пунктов высокой пропускной способности. – №2(31). – С.149–154.
109. **Учаева Т.В.** Использование заемных средств как фактор улучшения финансовых результатов предприятия. – №3(32). – С.191–197.
110. **Учаева Т.В.** Повышение эффективности управления бюджетными средствами в рамках бюджетирования, ориентированного на результат. – №2(31). – С.214–217.
111. **Учаева Т.В.** Эффективное использование оборотного капитала как фактор улучшения финансово-хозяйственной деятельности предприятия промышленности строительных материалов. – №1(30). – С.185–191.
112. **Учаева Т.В., Мебадури З.А.** Разработка мероприятий по эффективному управлению кредиторской задолженностью строительного предприятия. – №4(33). – С.208–214.

-
113. **Хаметов Т.И., Ишамятова И.Х.** Комплексное освоение территорий застройки Пензенской области. – №2(31). – С.174–180.
114. **Хархардин А.Н., Нелюбова В.В., Попов А.Л., Строкова В.В.** Топология измельченных микро- и нанодисперсных материалов различного минерального состава. – №2(31). – С.5–12.
115. **Черкасов В.Д., Стешин А.В.** Цементные композиты с повышенной ударной вязкостью. – №4(33). – С.5–9.
116. **Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Пильщиков В.О., Аникина Н.С.** Полимерные вяжущие для производства вибропоглощающих материалов. – №3(32). – С.59–67.
117. **Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Пильщиков В.О., Аникина Н.С.** Влияние пластификации на вибропоглощающие свойства полимерных материалов. – №3(32). – С.68–74.
118. **Чертес К.Л., Мартыненко Е.Г., Сафонова Н.А., Гришин Б.М.** Сравнительный анализ способов обезвреживания шламовых отходов перед их утилизацией в строительно-хозяйственной деятельности. – №3(32). – С.143–151.
119. **Шеин А.И., Зайцев М.Б., Зернов В.В., Зернов И.В.** Нормативно-правовые документы и регламенты в обеспечении надёжности зданий и сооружений. – №3(32). – С.94–98.
120. **Шеин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций. – №2(31). – С.64–71.
121. **Шумилкин А.С.** Сохранение исторической среды в условиях градостроительного развития (на примере здания ремесленной управы в Нижнем Новгороде). – №4(33). – С.180–185.