



ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 16 (149)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2009

ISSN 1991-9743

СЕРИЯ

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

Выпуск 8

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Редакционная коллегия серии:

д.т.н., профессор **В.М. Асташкин**

(*отв. редактор*);

Т.А. Кравченко (*отв. секретарь*);

д.т.н., профессор **С.Г. Головнев**;

д.т.н. **С.Е. Денисов**;

к.т.н., профессор **Ю.В. Максимов**;

д.т.н., профессор **В.И. Панферов**;

д.т.н., профессор **А.Н. Потапов**;

к.т.н., профессор **В.В. Спасибожко**;

д.т.н., профессор **Б.Я. Трофимов**.

Серия основана в 2001 году.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-26455
выдано 13 декабря 2006 г. Федеральной службой по
надзору законодательства в сфере массовых комму-
никаций и охране культурного наследия.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы
данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Высшей аттестационной комиссии
Министерства образования и науки Российской Фе-
дерации журнал включен в «Перечень ведущих ре-
цензируемых научных журналов и изданий, в кото-
рых должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертации на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук».

Подписной индекс Вестника ЮУрГУ, серия
«Строительство и архитектура» 29563, объединенный
каталог «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год.

СОДЕРЖАНИЕ

Градостроительство и архитектура

ПОНОМАРЕНКО Е.В. Архитектура сельских деревянных церквей первой половины – середины XIX века на Южном Урале	4
БЕРЕЗИН Д.В. Архитектурная композиция элитарного жилища	9
БОБЫЛЕВ А.В., МАЛАЕВ А.В., РАССКАЗОВА Н.С. Градостроительный и гидроэкологический подходы при создании схем территориального планирования муниципальных образований	15

Экспертиза и оценка объектов недвижимости

ВОРОШИЛОВ А.П., КАРАЧЕНЦЕВ Ю.А. Выбор местоположения станций при наземном лазерном сканировании зданий и сооружений	20
---	----

Теория расчета строительных конструкций

ПОТАПОВ А.Н., ДЕГТЯРЕВА Н.В. Временной анализ модели надземного газопровода с односторонними связями при аэродинамической неустойчивости	23
--	----

Строительные материалы, изделия и конструкции

ГАМАЛИЙ Е.А., ТРОФИМОВ Б.Я., КРАМАР Л.Я. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбонатного пластификатора	29
АБЫЗОВ В.А., КЛИНОВ О.А. Жаростойкий фосфатный газобетон с добавками отходов огнеупорного волокна	36

Инженерное оборудование зданий и сооружений

ВАСИЛЬЕВ Ю.С., ПАНФЕРОВ В.И. Об определении скважности и периода при импульсном режиме отопления зданий	38
ВАСИЛЬЕВ Ю.С., ДОНСКАЯ А.Б. Инженерные формулы для определения постоянной времени	43
ПАНФЕРОВ С.В., ТЕЛЕГИН А.И. Анализ качества выбора и настройки автоматического регулятора уровня жидкости	49
КУРИЦЫН Б.Н., МЕДВЕДЕВА О.Н., ИВАНОВ А.А. Исследование тепловой эффективности водогрейных аппаратов, работающих на газовом топливе	54

CONTENTS

Urban planning and architecture

PONOMARENKO E.V. Architecture of rural wooden churches of first half – the middle of the XIX century in the South Ural	4
BEREZIN D.V. Architectural concept of élite habitation	9
BOBYLEV A.V., MALAEV A.V., RASSKAZOVA N.S. Town-planning and hydroecologic approaches in the light of municipal planning schemes development	15

Appraisal and estimation of objects of estate property

VOROSHILOV A.P., KARACHENTSEV Y.A. Choice of station location at surface laser scanning of buildings and constructions	20
--	----

Theory of structural analysis

POTAPOV A.N., DEGTYAREVA N.V. Time analysis of elevated gas pipeline with one-way connections under aerodynamic instability	23
---	----

Building and constructional materials, items and structures

GAMALIY E.A., TROFIMOV B.Y., KRAMAR L.Y. Structure and properties of cement stone with admixtures of silica fume and polycarboxylate plasticizing agent	29
ABYZOV V.A., KLINOV O.A. Heat-resistant phosphate gas concrete with admixtures of waste of fireproof fibres	36

Plumbing and heating installations of buildings and constructions

VASILIEV Y.S., PANFEROV V.I. About porosity and period definition at the pulse mode of buildings heating	38
VASILIEV Y.S., DONSKAYA A.B. Engineering formulae for time constant definition	43
PANFEROV S.V., TELEGIN A.I. Analysis of choice quality and adjustment of the automatic fluid level controller	49
KURITSYN B.N., MEDVEDEVA O.N., IVANOV A.A. Research of thermal efficiency the water-heating devices working on gas fuel	54

Градостроительство и архитектура

УДК 72.03(09)(086.6)

АРХИТЕКТУРА СЕЛЬСКИХ ДЕРЕВЯННЫХ ЦЕРКВЕЙ ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ – СЕРЕДИНЫ XIX ВЕКА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ*

Е.В. Пономаренко

ARCHITECTURE OF RURAL WOODEN CHURCHES OF FIRST HALF – THE MIDDLE OF XIX CENTURY IN SOUTHERN URAL

E.V. Ponomarenko

В статье рассматривается широкий круг вопросов, связанных с архитектурой деревянных церквей Южного Урала. Выявлен интересный пласт наследия региона. Приведен обширный материал натуральных обследований памятников и анализ чертежей. На основе этих материалов рассмотрены особенности и характерные черты композиции, планировочного решения, декора деревянных культовых зданий региона.

Ключевые слова: появление российских поселений на Южном Урале, особенности архитектуры деревянных церквей первой половины XIX века, особенности архитектуры деревянных церквей середины XIX века.

In article the wide range of the questions connected with architecture of wooden churches of Southern Ural is considered. The interesting layer of a heritage of region is revealed. The extensive material of natural inspections of monuments and the analysis of drawings is resulted. On the basis of these materials features and characteristic lines of a composition, decisions of the plan, a decor of wooden cult buildings of region are considered.

Keywords: occurrence of the Russian settlements in Southern Ural, feature of architecture of wooden churches of first half XIX century, feature of architecture of wooden churches of the middle of XIX century.

Строительство христианских храмов на Южном Урале начинается в XVIII веке с присоединения этой территории к России и появлением русскоязычного населения. В процессе освоения региона казаками, как отмечает Ф.М. Стариков [1], здесь строятся небольшие казачьи поселения, русские и других этнических групп. Они возникают одновременно с крепостями как слободы, необходимые для обслуживания армии.

Например, П.С. Паллас [2] описывает: «... большую слободу Кундраву, состоящую более, нежели из ста дворов и лежащую на юго-западной стороне озера от башкирцев Кундрава-куле именуемого». Были известны и небольшие слободы и крупные – насчитывающие более ста дворов. Как правило, они обносились укреплениями.

Главной высотной доминантой поселка была церковь. Деревянный храм, как правило, являлся

первым в поселении. Часто со временем вместо деревянного сооружалось новое каменное здание. Заказчиками строительства являлись казаки отдельной станицы, которые финансировали строительство храма своими пожертвованиями. Аналогичный процесс наблюдался и в других казачьих регионах, например, на Дону.

Деревянных храмов XVIII века в южноуральском регионе не сохранилось. Церкви начала XIX века известны только по архивным источникам. Они имели композиционную схему кораблем, то есть с последовательно расположенными колокольней, трапезной и основным четвериком. Большинство из них отличал очень скромный декор, а колокольни завершались шатром, иногда в формах петровского барокко [3].

Например, сохранился проект деревянной Рождественской церкви Юрюзань-Ивановского

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 07-06-96004.

завода [4]. Входной придел с колокольной, трапезная и основная часть внешне составляли единый объем под общей крышей. К нему была пристроена пятигранная алтарная апсида. Здание имело три входа: с запада, севера и юга. Трапезная была отделена стеной с тремя проемами, а входной придел – стеной с одним проемом. Основной объем имел на крыше завершение в виде невысокого фигурного шатра на граненом барабане. Колокольная находилась на крыше. Она состояла из четверика с куполообразным завершением и звона, увенчанного шатром. Стены были прорезаны прямоугольными окнами с полуциркульным завершением. Общие пропорции церкви были несколько приземисты. Колокольная значительно возвышалась над основным объемом церкви (рис. 1).

Храмы середины XIX века воздвигались по той же композиционной схеме, но отличались более изысканным ордерным оформлением. Как правило, они стояли на цоколе из камня-плитняка. К этому типу в Оренбургской области можно отнести церкви: Иоанна Богослова в с. Черный отрог Саракташского района (первая церковь, 1840-е гг.), Покровскую в селе Студенцы Саракташского района. В Челябинской области – это Петропавловская в селе Неплюевка Карталинского района, Пророка Ильи в селе Осиповка Троицкого района, Св. Петра в поселке Подгорное Троицкого района, Казанской Божьей Матери в станице Лейпциг.

Церковь Казанской Божьей Матери в станице Лейпциг Варненского района Челябинской области была построена в 1874 году мастерами из Нижнего Новгорода и Пскова, но ее декоративное решение относится к стилю классицизм. Колокола были куплены в Нижнем Новгороде. Церковь расположена в центре станицы на плацу для джигитовки. Здание бревенчатое, обшитое шпунтованной доской. Композиционный тип «кораблем». План включает последовательно прямоугольные: колокольную, трапезную, основной объем и алтарь. Цоколь – из камня-плитняка. Основной объем перекрыт четырехскатной крышей с крупной луковичной главкой на граненом барабане в центре. С запада расположен основной вход. Барабан декорирован протодорическими колонками по углам и

накладными полуциркульными арочками между ними. Арки полуциркульной формы, окна имеют узкие простые наличники. Аналогичные окна распложены в нижнем ярусе колокольной, трапезной и алтаре. В северной стене трапезной после пожара сохранилось только одно окно. С севера и юга основной объем имеет двери с арочным завершением, а в верхней части по три больших арочных окна с ковеной решеткой. Колокольная состоит из двух четвериков, восьмерика и шатра с луковкой на высоком барабане. По основанию шатра распложены окошечки с кокошниками, переходящие в проемы звона (восьмерика). Углы колокольной и всех остальных объемов церкви, которые имитируют колонны, напоминающие о стиле классицизм. Карнизы тоже имеют сложный профиль. Эти детали роднят здание с кирпичными храмами в классическом стиле XVIII века. В настоящее время церковь находится в плачевном состоянии. Утрачена часть завершения колокольной и почти вся северная стена основного четверика (рис. 2).

Церковь Св. Петра в поселке Подгорное Троицкого Челябинской области района была построена в середине XIX века. В 2003 году эта церковь сгорела. Расположена она была на окраине села, на возвышенности. Там и сейчас сохранился фундамент и цоколь из камня-плитняка. Облик церкви можно восстановить по сохранившимся архивным фотографиям. Здание было бревенчатое, обшито тесом, построено по типу храма «кораблем». План состоял из колокольной, трапезной, основного объема и алтарной апсиды пятигранной формы. Основной объем – четверик, который был завершен маленькой луковичной главкой на высоком барабане. Трапезная имела двускатное покрытие. Колокольная представляла собой восьмерик на четверике с шатровым завершением, на самом верху с небольшой луковкой.

Церковь Петра и Павла в поселке Неплюевка Карталинского района Челябинской области (рис. 3) была построена в середине XIX века. Здание – главный высотный ориентир станицы, эффектно возвышается на большой площади. Композиция традиционна – последовательно распложены: колокольная на узком входном приделе, низкая

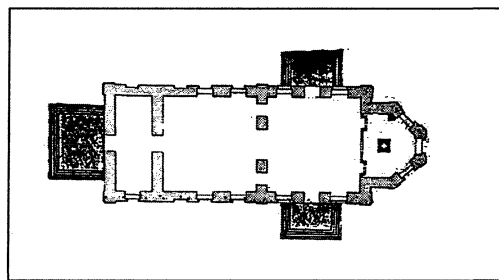
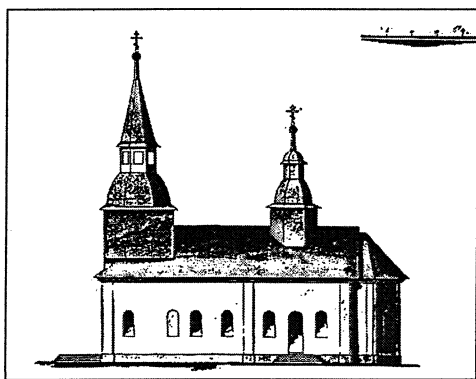


Рис. 1. Проект Рождественской церкви Юрюзань-Ивановского завода



Рис. 2. Церковь Казанской Божьей Матери в станице Лейпциг

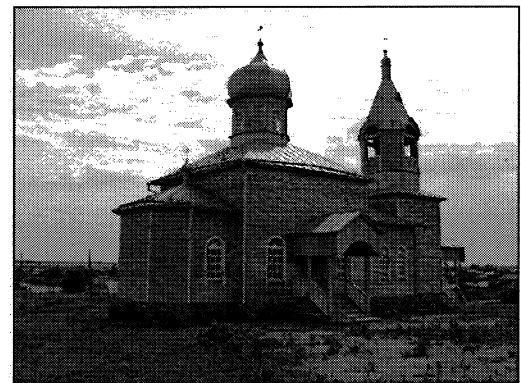
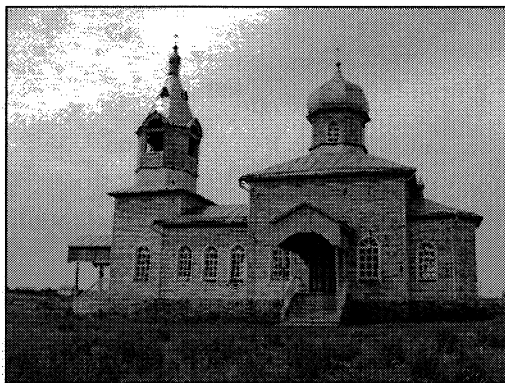


Рис. 3. Церковь Петра и Павла в поселке Неплюевка

трапезная, более высокий односветный четверик и пятигранная апсида алтаря. Пропорции храма несколько вытянуты горизонтально, что еще более подчеркивается сильно выступающим крыльцом западного фасада. Элемент центричности вносят северный и южный входы в четверик, которые имеют такие же скромно оформленные глубокие крыльца с двускатным навесом. Ощущение приземистых пропорций возникает из-за недостаточной высоты вертикалей колокольни и завершения четверика. Четверик с четырехскатным покрытием имеет одну небольшую луковичную главку на невысоком восьмигранном световом барабане. Окна барабана чередуются с прямоугольными филёнками, выделенными цветом. Все окна храма одной и той же формы – высокие прямоугольные с полуциркулярным завершением и мелкой расстекловкой. В барабане они имеют простые рамочные наличники, а в остальных частях здания – перспективные из полочек. Здание деревянное, обшито тесом, стоит на фундаменте из камня-плитняка. Декор очень скромный, ордерные элементы представляют собой подобие пилястр на колокольне и очень тонкие лопатки по углам основных объемов. Выразительность придает выделение декора контрастным цветом. Колокольня более декоративна. Она включает только ярус звона и шатровое завершение с луковкой на высоком граненом барабане. Шатер имеет локарны, а проемы звона завершены килевидными кокошниками. В настоящее время церковь действующая.

Храм Ильи Пророка в поселке Осиповка Тро-

ицкого района Челябинской области был возведен в 1836–1827 годах. Это здание значительно пострадало в советское время, утратив завершение и апсиду алтаря. Тем не менее, нижняя часть церкви неплохо сохранилась, поскольку использовалась как клуб. Композиционное решение храма было традиционным, развивающимся по оси. Конструкция – срубная на фундаменте из камня-плитняка. Сохранились входной придел, трапезная и основной четверик, постепенно увеличивающиеся в ширину. Здание имело дополнительные входы с севера и юга, причем северное крыльцо сохранилось. Декором по-видимому служили классические пилястры по углам основных объемов, остатки которых хорошо читаются на срубе. Эта церковь передана верующим, но пока не восстанавливается (рис. 4).

Церковь Иоанна Богослова в селе Черный отрог Саракташского района Оренбургской области была построена в 1840-е годы. Она сильно обезображена многочисленными перестройками. В настоящее время элементов первоначальной постройки практически не сохранилось. Существует колокольня, перестроенная в стиле модерн с мощными приземистыми ярусами и шатровым завершением. В верхнем ярусе располагаются широкие окна с лучковым завершением, форма и рисунок переплетов которых соответствуют стилистике модерна. Под окнами проходит широкая лента орнамента. Вокруг основного объема традиционной планировки и композиции с последовательно расположенными колокольней, трапезной и ос-

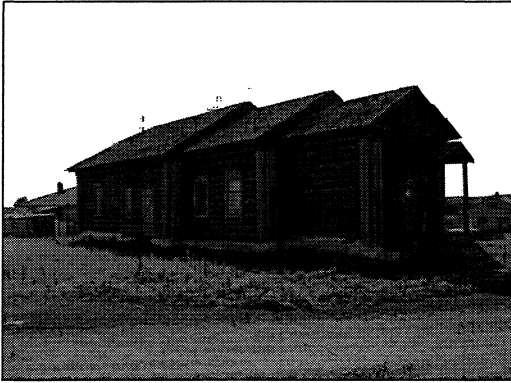


Рис. 4. Церковь Ильи Пророка в поселке Осиповка

новным четвериком сооружена кирпичная оштукатуренная галерея. Имеется два входа с деревянными крыльцами – западным и южным. Оба крыльца декорированы пропиленной резьбой и декоративными столбиками. Стены галереи украшены мерным ритмом упрощенных дорических пилястр, на которые опирается сильно вынесенный деревянный карниз. В простенках расположены прямоугольные окна с полуциркульным завершением. Поскольку в настоящее время рядом построена новая каменная церковь Иоанна Богослова, судьба старого храма вызывает опасения (рис. 5).

Покровская церковь в селе Студенцы Саркатышского района Оренбургской области имела типичный для сел Южного Урала пропорциональный строй и композиционное решение с последовательно расположенными колокольной, трапезной, четвериком и алтарной апсидой. Завершение четверика мощное, характерное для казачьих сел региона. Крупный восьмигранный барабан увенчан куполом с главкой на высокой шее. Барабан от купола отделяет сильно вынесенный профилированный карниз. Окна барабана имеют традиционную прямоугольную форму с полуциркульным завершением. Однако завершение четверика, как и колокольня, имеют деревянную обшивку, характерную уже для периода модерна. Пропорции и декор колокольни, которая срублена «в лапу», а не «в обло», большие прямоугольные окна соответствуют стилистике модерна. В настоящее время церковь перестроена коренным образом. Со всех сто-

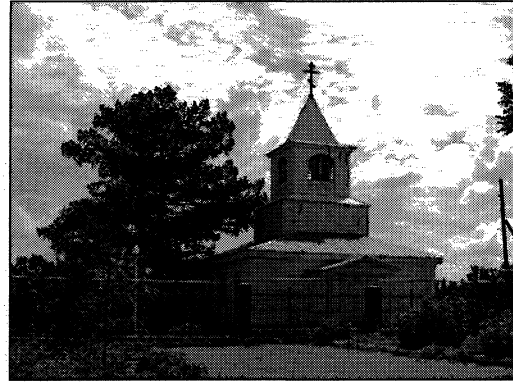


Рис. 5. Церковь Иоанна Богослова в селе Черный Отрог

рон сооружены дополнительные приделы и галереи из кирпича, которые сильно исказили объемное и планировочное решения. Непрофессиональная реконструкция выполнена за счет прихода (рис. 6).

Таким образом, можно констатировать, что подавляющее большинство деревянных церквей в регионе имеет традиционный планировочный тип «кораблем». Храмы строились постепенно, поэтому часто встречаются более поздние пристройки дополнительных приделов и галерей. Отдельные части зданий часто решены в разной стилистике, характерной для периода их строительства.

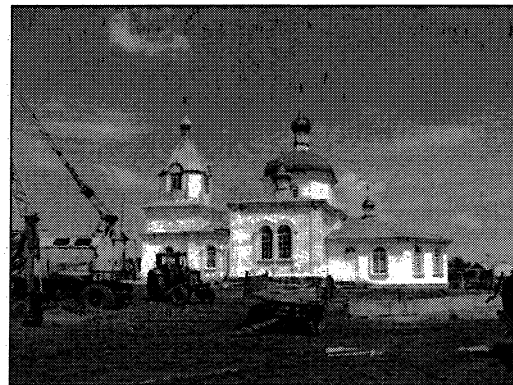
Хотя в культовом зодчестве особенно сильны традиции и долго сохранялись строительные приемы и декоративные элементы предшествующих эпох, в целом архитектура церквей проходит те же стилистические этапы, что и во всей России. В первой половине XIX века на Южном Урале господствовал стиль классицизм. Композиции объемов и фасадов тяготели к трехчастности. В дереве воспроизводились элементы каменного классического декора с сильно упрощенными профилями. В начале XX века нередко встречается достройка колоколен церквей в стилистике модерна.

Сельские церкви Южного Урала выделяются своими крупными размерами и местонахождением. Они часто располагаются на берегу озера или реки, как правило, поблизости находится главная площадь поселения.

Состояние деревянных церквей в регионе вы-



Рис. 6. Церковь Покрова Пресвятой Богородицы в селе Студенцы



Градостроительство и архитектура

зывает серьезную обеспокоенность. Многие из них утрачены, другие обезображены потерей отдельных элементов или непрофессиональной реконструкцией.

Литература

1. Стариков, Ф.М. *Откуда взялись казаки (исторический очерк)* / Ф.М. Стариков. – Оренбург: Тип. Ефимовского-Мировицкого, 1881. – С. 264.

2. Паллас, П.С. *Путешествие по разным провинциям Российского государства* / П.С. Паллас. – СПб.: Тип. При Императ. Академии наук, 1786. – Ч. 2. – С. 476.

3. РГАДА (Российский государственный архив древних актов), ф. 271, оп. 3, д. 2806; д. 1080; д. 3207.

4. РГИА (Российский государственный исторический архив), ф. 37, оп. 63, д. 54, л. 26.

Поступила в редакцию 16 марта 2009 г.

Пономаренко Елена Владимировна, кандидат архитектуры, доцент кафедры «Искусствоведения и культурологии» ЮУрГУ.

Область научных интересов: история и теория архитектуры и градостроительства, реставрация и сохранение памятников архитектуры, градостроительство и архитектура Южного Урала в XVIII – начале XX вв.

Контактный телефон: 8-922-702-36-30.

Ponomarenko Elena Vladimirovna, a candidate of the architecture, assistant professor of the pulpit "Iskusstvovedeniya and kulturologii" YUURGU.

Area scientific interest: history and theory of the architecture and urban planning, restoration and conservation monument architectures, urban planning and architecture South Ural in XVIII – begin XX age.

Contact phone: 8-922-702-36-30.

АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭЛИТАРНОГО ЖИЛИЩА

Д.В. Березин

ARCHITECTURAL CONCEPT OF ÉLITE HABITATION

D.V. Berezin

Проблема стихийного формирования жилища элитарного класса в современной отечественной архитектуре актуализирует поиск научно обоснованной системы критериев для создания и оценки такого жилища. В настоящей работе решается эта задача через построение концепции элитарного жилища, основанной на промежуточном типе жилой застройки как наиболее перспективном в этом смысле.

Ключевые слова: архитектура жилища, элитарное жилище.

The problem of spontaneous formation of habitation of élite class in modern Russian architecture actualizes the search for scientifically justified set of criteria for creation and estimation of such habitation. The present article solves this problem via making the concept of élite habitation. The concept is based on the intermediate type of dwelling development as the most promising in this aspect.

Keywords: architecture of habitation, élite habitation.

Становление многоядерной рыночной экономики в России, начавшееся с конца XX столетия, повлияло на изменение представлений об архитектуре жилища. Рыночные стандарты обусловили сегодняшнее многообразие подходов к формированию жилой архитектуры. Понятие «элитарный» описывает наиболее качественный спектр этого многообразия. Элитарное жилище, сочетающее передовые технологии и достижения в строительстве и инженерии, дорого, однако спрос на него неуклонно растет. Общее улучшение условий жизни населения стимулирует интерес к повышенному комфорту проживания.

Несмотря на неоднозначность трактовки термина «элитарный», в современной России сформировался относительно устойчивый комплекс критериев элитарности (размещение в центральных районах города, высокое качество строительства и строительных материалов, активное внедрение современных инженерных коммуникаций, применение серьезных охранных систем, наличие вместительного гаража, наличие комфортабельных квартир площадью не менее 120 м², своеобразие внешнего облика). Наряду с этим, очевидна неполнота архитектурной направленности этого комплекса: в нем не затрагиваются в должной мере вопросы пространственного решения домов и их ближайшего окружения, объемно-пластической организации, не уточняются характеристики окружающей среды и плотности показатели. (Отсюда и бытующее сегодня ранжирование элитарного жилища по цене и количеству «опций»: «бизнес-класс», «класс люкс», «эксклюзивный класс»).

Собственно архитектурные задачи при формировании высококомфортабельного престижного

жилища решаются средствами вчерашнего дня, не отвечающими современным ожиданиям, то есть элитарное жилище складывается по существу стихийно, без привлечения широкого пласта свойств подлинно комфортабельной жилой среды: развитого естественно-природного компонента, высокого уровня приватности проживания, индивидуализации базовых компонентов жилища... Это приводит к мысли, что элитарное жилище как архитектурная категория не сформировано.

Соответствие архитектурного эквивалента понятию «современное элитарное жилище» необходимо вести в соответствии с передовыми подходами и прогнозируемой ситуацией в области жилища. А сегодня понятие «жилище» связывается с экологически благополучной благоустроенной обособленной средой, энергосберегающими и биопозитивными подходами к проектированию, и жилище будущего видится именно таким (особенно жилище эксклюзивное).

Современное представление о жилище обуславливает интерес к формам проживания, обладающим перечисленными свойствами. Однако приобщение к этим формам возможно через отказ от утвердившегося сегодня в России типологического стандарта жилища (в том числе и как элитарного), связанного с многоквартирным многоэтажным домом. Этот род жилой застройки потерпел фиаско в качестве формата постоянного проживания во всех развитых странах мира еще в 1970-х гг. прошлого века. Единодушно признанные мало пригодными, высотные жилые дома строятся сегодня за рубежом для сдачи в аренду; в ином случае – как демонстрация новейших технологий и уникального авторского почерка конкрет-

ного архитектора, надеясь при этом эксклюзивными по своим характеристикам апартаментами, которые служат вторым или третьим жилищем для своих обеспеченных владельцев.

Конверсия бывших производственных помещений в эксклюзивное дорогое жилище, так же как и строительство элитарных «высоток» – явления немногочисленные и с трудом поддающиеся типологическим построениям, а потому не репрезентативны для формирования концептуальной основы архитектуры элитарного жилища.

Противоположная коллективному жилищу индивидуальная форма проживания также не пригодна для построения концепции. В силу дороговизны и дефицита территорий под застройку в городе, идея односемейного высококомфортабельного дома (т.е. крупного отдельно стоящего на персональном участке особняка) мало реализуема. При других обстоятельствах, когда колонии индивидуальных домов занимают более обширные и менее дорогие периферийные территории, возникает ряд проблем, уводящих такое жилище от статуса элитарного. При низкой плотности застройки удлиняются транспортные маршруты, жилище отрывается от социальной инфраструктуры, традиционно растущей меньшими темпами, культурной и деловой жизни города. Главное негативное последствие такой ситуации – замкнутость человека внутри небольшого владения.

Таким образом, потребность в максимально персонализированном жилище с одной стороны, экономические и территориальные барьеры – с другой, а также задача гуманизации жилой среды, выводят к некому компромиссному, полундивидуальному роду жилой архитектуры, вобравшему в себя высокие экономические показатели квартирного дома, высокий комфорт и развитую природную составляющую.

Этот тип жилого дома можно обозначить как промежуточный – между индивидуальным и коллективным. В идеале такая жилая структура сочетает в себе преимущества жизни в собственном доме с выгодами проживания в городе и включает следующие, принципиальные для элитарного жилища, свойства.

1. Постройка обладает камерным характером особняка и достигает высоты максимум в пять–шесть этажей («не выше высоты деревьев»). Дом служит для проживания небольшого количества не состоящих в родстве семей, являясь при этом для них первичным, круглогодичным жилищем. Практика показывает, что размещение свыше восьми квартир с общеквартирными коммуникациями в доме начинает противоречить идее приватности, поэтому такая жилая структура должна состоять не более чем из 10–12 жилых ячеек, при условии, что ячейки первых этажей имеют автономный доступ с улицы. В доме могут также размещаться места приложения труда для жильцов (например, образ жизни городского предпринимателя – жизнь

над лавкой или мастерской), закрытая инфраструктура («клубные помещения»), но без малейшего снижения высокого качества проживания. Жилые ячейки блокируются преимущественно по вертикали, реализуя идею интенсификации использования дорогой городской земли.

2. Жилище выполняется по индивидуальному проекту с учетом возможностей, основных запросов и предпочтений будущих жильцов. Так, высоко индивидуализированными оказываются не только экстерьеры жилых ячеек, но и их объемно-планировочная структура, функциональное наполнение, способ их связи с землей и характер их открытых пространств (балконов, террас, лоджий).

3. Органичной составляющей программы проживания является тесная связь с природным окружением как на уровне непосредственного контакта с квартирами, так и на уровне общегородских ландшафтных доминант. Наиболее полный вариант такой связи раскрывается в следующих положениях: размещение вблизи общегородских рекреационных зон, располагающих парком (лесопарком), акваториями; наличие земельного участка, принадлежащего всем жильцам дома; наличие своих участков у квартир приземного уровня, что касается квартир верхних уровней у них также могут быть участки. Компенсация отсутствия прямой связи с ними в виде террас, лоджий, галерей, балконов, являющихся площадками для переносимых в теплое время года из зимних садов растений; открытые пространства при этом не только восполняют отрыв от земли, но, будучи озелененными, дают эмоционально позитивные видовые кадры со «своим садом» на первом плане и городскими природными комплексами на дальних планах; включение в состав квартир зимних садов, связанных как с закрытыми, так и с открытыми пространствами квартиры; обеспечение наибольшего сектора ориентации каждой квартиры.

4. Приватность как потребность человека в своем доме на своей земле основывается в данном случае на трактовке жилища как системы «дом – прилегающая территория». Таким образом, фундаментальная для любого хорошего жилища идея приватности реализуется, прежде всего, в отделении постройки от соседних домов и дорог пространственным буфером обособленной территории. Приватная атмосфера также достигается пространственным и, по возможности, визуальным разделением жилой и социальной функций, минимизацией спонтанных соседских контактов вследствие малого числа жилых ячеек, имеющих общие коммуникации – лестницу, лифт (не исключена возможность надления персональной связью с землей всех жилых ячеек, при небольшом их количестве), хорошей визуальной и звукоизоляцией между квартирами, наличием у каждого жильца развитой личной группы помещений.

5. Элитарное жилище в полном смысле будет таковым, если архитектурными, инженерными

средствами и обслуживанием здесь обеспечены высококомфортные условия проживания. Они достигаются: привлечением обслуживающего персонала; формированием в квартире четырех функциональных блоков: распределительной, общественной, приватной и обслуживающей, их развитым составом помещений (рис. 1); наличием двух систем коммуникаций: для хозяев и гостей и для обслуживающего персонала; круглосуточной охраной домовладения; размещением в нижнем уровне развитой парковки из расчета две–три машины на каждую семью; развитостью и современностью инженерных систем, их независимой работой и снабжением жилища необходимыми ресурсами; применением высококачественных материалов и передовых технологий строительства.

Представленная концептуальная модель центрируется на пяти вневременных свойствах – доминирующем жилом назначении, индивидуализации, связи с природой, приватности и высоком комфорте – выявленных автором в ходе исследования высококомфортабельного жилища от античности до наших дней¹. Но у модели появилась большая прикладная значимость и системная целостность, если положения концепции раскрыть через реальные составляющие жилища – жилые ячейки, внеквартирные помещения и придомовую территорию, дом, место в городе.

Жилые ячейки (см. рис. 1)

Жилые ячейки характеризуются широким и индивидуализированным набором помещений, которые komponуются в четыре функциональных блока: распределительный (прихожая и следующие за ней холл), приватный (личные жилые помещения), обслуживающий (комната обслуживающего персонала, кладовая, иногда дублирующий выход и, возможно, кухня) и общественный. Общественный блок наиболее крупный, обладает развернутой рекреационно-познавательной программой (гостевые комнаты, библиотека, тренажерный зал, кабинет, бильярдная, каминная и телевизионная комнаты). Приватный блок включает родительскую и детскую спальни, снабженные санитарно-гигиеническими узлами и гардеробными, учебную, игровую комнаты и, возможно, кабинет, студию или мастерскую для занятий творчеством или труда на дому. Помещения общественной зоны выполняются как пространственно и визуально взаимосвязанная система помещений, ориентированная, по возможности, на наиболее выразительные перспективы и на наиболее многолюдные и шумные участки.

Особая группа пространств – это пространства открытые. Каждая квартира первого этажа снабжается своим участком земли, это делает до-

роже содержание квартиры, но дает колоссальный эмоционально позитивный эффект. Расположенные выше квартиры имеют балконы, развитые лоджии, террасы на эксплуатируемой крыше. Открытыми пространствами могут снабжаться помещения как из общественной, так и из приватной зоны.

Квартиры первых этажей обеспечиваются своими входами со своих же участков. Входные группы изолируются пространственно и визуально, чему способствует использование всего периметра здания для их организации; незапланированные встречи соседей, таким образом, сводятся к минимуму. В поэтажные холлы важно обеспечить выход не более чем двум квартирам, а лучше одной. Минимизация количества квартир, выходящих на одну лестничную клетку создает иллюзию обладания собственной лестницей, что делает ее в большей степени продолжением жилища, чем в случае, когда лестница общедоступна и становится как бы продолжением улицы до самого интерьера квартиры. Следует добиваться минимального количества квартир и в доме (не более 12) для обеспечения высокого стандарта проживания.

Как показало экспериментальное проектирование, площадь квартиры, создаваемой по описанной схеме может составить 450–500 м². Вместе с тем, сегодня активно развивается тенденция жить в городе на небольших площадях. Предпочтение отдается оригинально и рационально спланированному пространству квартиры, ее экологическому благополучию и хорошему обслуживанию. Но и учитывая эту тенденцию, принципы представленной схемы жилой ячейки, состоящие в апробированном функциональном зонировании и композиционных связях – актуальны.

Внеквартирные помещения и придомовая территория

Блок общих помещений как основа существования микроколлектива (возникновению которого способствует закрытый режим функционирования элитарного жилища, немногочисленность проживающих, а также их предполагаемый гомогенный социальный состав) должен формироваться с учетом пожеланий домовладельцев, поскольку наличие инфраструктуры в доме, особенно закрытой («клубных помещений»), увеличивает эксплуатационные расходы, и соответственно, квартирную плату. Первейшими из таких помещений являются вестибюль и холлы, связанные с межквартирной лестницей и лифтом. Возможны также и такие сервисы, как спортивный комплекс, библиотека, каминная комната – в цокольном или первом этаже, терраса и солярий – на крыше. Все эти функции, могут быть размещены в каждой квартире, но выведение их за пределы отдельных жилищ в качестве общедоступных в доме дает возможность сделать помещения больших размеров и лучше оборудованными, чем в пределах одной квартиры. Другие внеквартирные помещения – комнаты

¹ См. Березин Д.В. Архитектура «Городской виллы» как направление развития элитарного жилища: автореф. дис. ... канд. архитектуры. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.

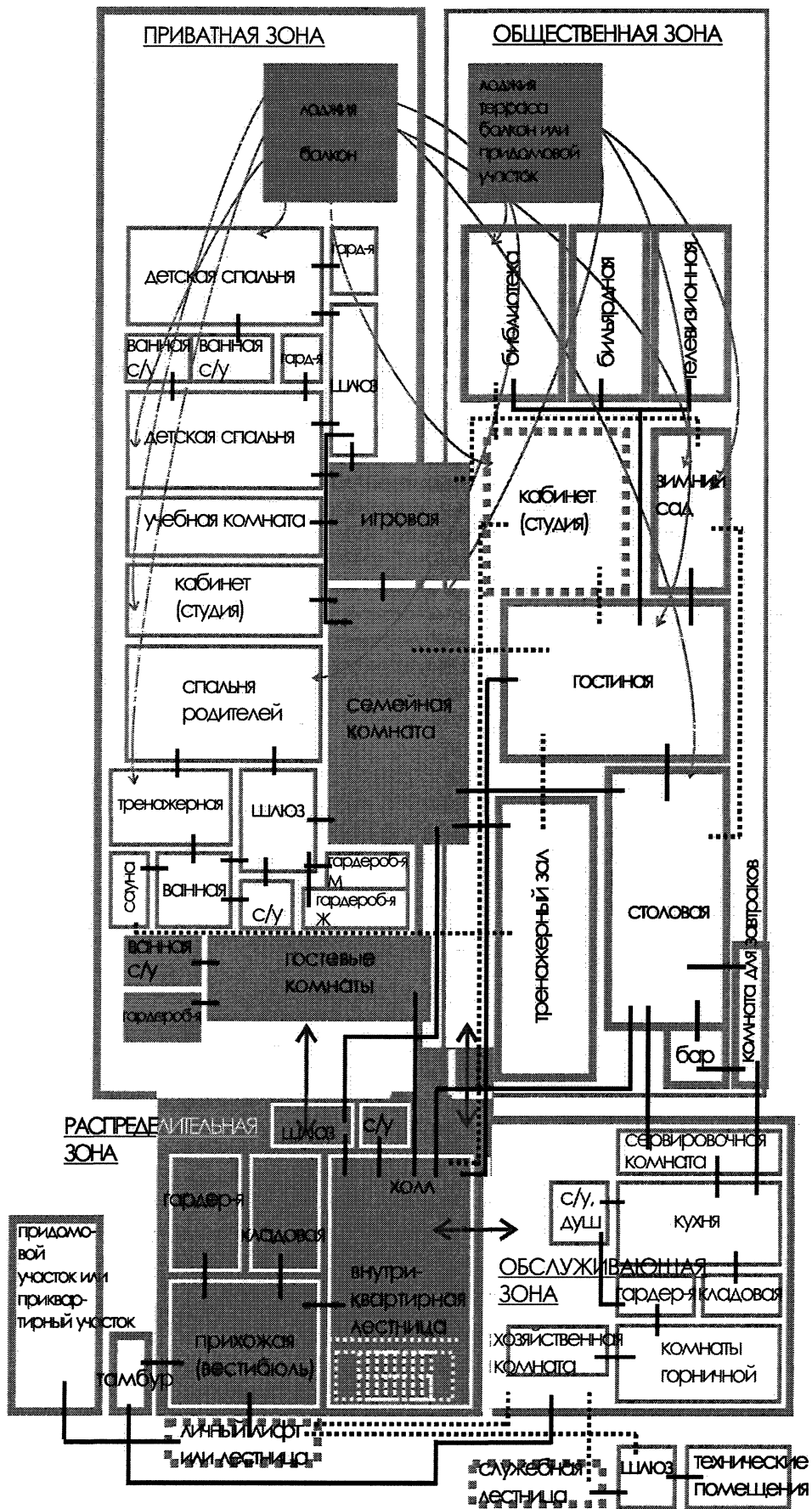


Рис. 1. Концептуальная модель элитарного жилища. Принципиальная схема жилой ячейки

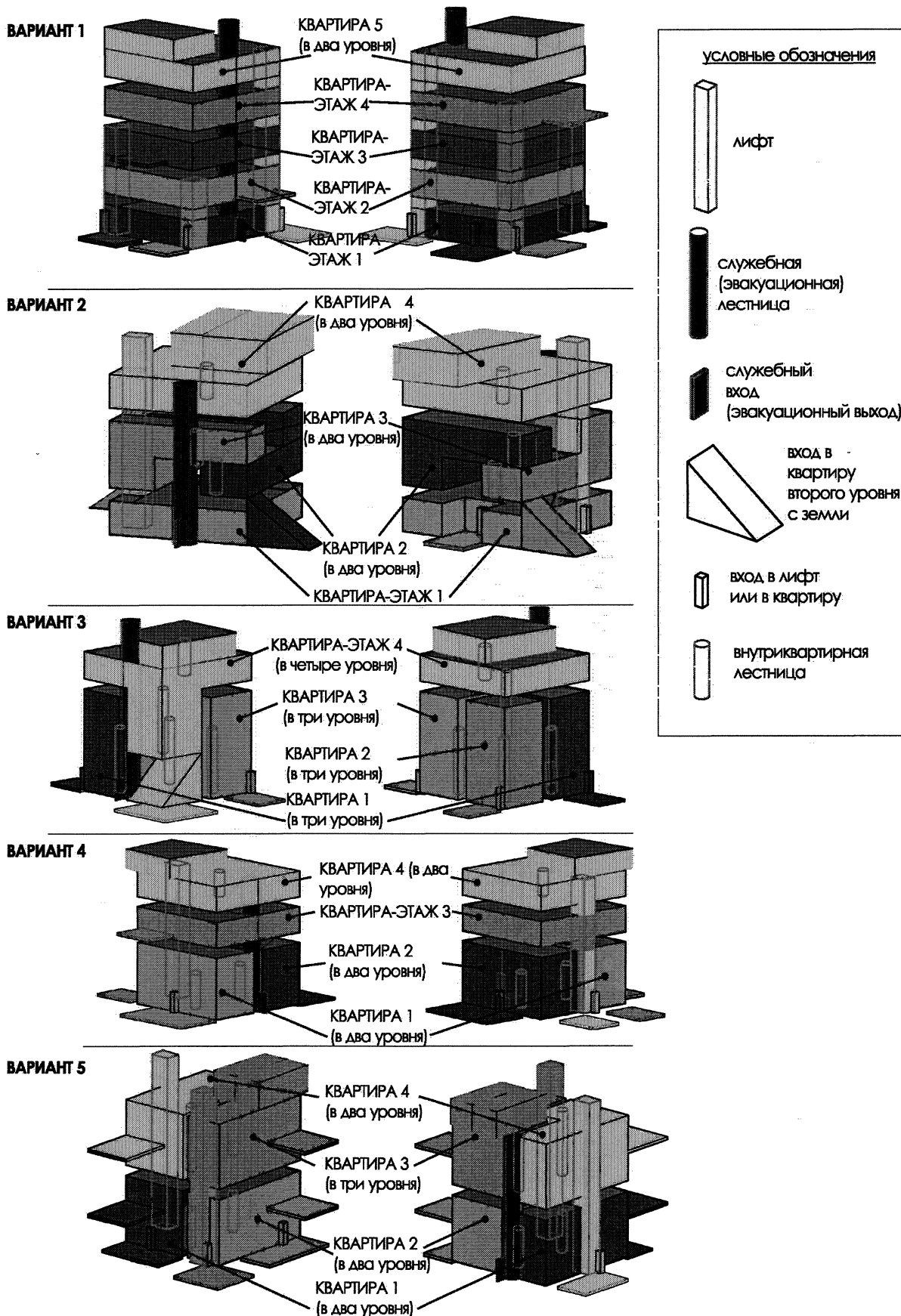


Рис. 2. Концептуальная модель элитарного жилища. Принципиальные схемы компоновки зданий на основе минимального числа жилых ячеек с обязательным автономным доступом с уровня земли и приквартирным участком

обслуживающего персонала, технические и подсобные помещения, подземный гараж в пределах габаритов здания.

На придомовой территории, исходя из главных ценностей элитарного проживания, в первую очередь разбиваются индивидуальные приквартирные участки, размещается гостевая парковка, затем устраиваются мелкомасштабные общие площадки, снабженные уличной мебелью и необходимым оборудованием; часть территории занимают въезд в подземный гараж и общий подход к дому. В качестве преград на территории домовладения разумно применение живых изгородей или невысоких стен. Высаженные по периметру домовладения деревья акцентируют традиционную для хорошего жилища замкнутость и придают всей придомовой территории камерный характер.

Дом (рис. 2)

Весь строй планировочных и функциональных характеристик описываемой модели, принципы организации пространства, определяют некие общие параметры объемно-пространственной композиции здания. Оно представляет собой точечный 3–6-этажный объем с развитой пластикой, обусловленной большим количеством открытых помещений, активной пространственной артикуляцией отдельных жилых ячеек со своими входными группами и богатой светотенью в сочетании с разной фактурой поверхностей. У здания отсутствуют такие характерные для традиционного городского дома элементы, как ряд одинаковых подъездов, арки, контрастно решенный первый этаж (ввиду расположения там общественных учреждений).

Большие возможности интеграции постройки в природное окружение дают перепады рельефа на участке строительства. Используя это преимущество можно также организовать самостоятельные входы в квартиры, расположенные в разных уровнях дома.

Венчающий ярус здания будет отличаться от остальных, так как призван активизировать его силуэт на фоне внешней среды, например, путем уменьшения периметра плана, изменения его конфигурации и индивидуальной отделки.

Место в городе

Параметры местоположения элитарного жилища в городе продиктованы самим его статусом: никому не выгодно, если на непрестижном месте возводится престижный дом или наоборот. Поэтому участки под застройку выбираются исходя из следующих базовых факторов: близости природных

доминант места (селитебная периферия лесопарковых зон, побережья рек и водохранилищ), розы ветров (исключение влияния промышленного сектора города), отсутствия непосредственного примыкания к магистралям и удобной связи с центрами притяжения.

Относительно центральности размещения домовладений (т.е. расположения относительно центра города) можно сказать, что это будет участок близкий к окраине, так как именно на периферии появляется возможность дешево приобрести обширные площади земли, а транспортные расходы не обременят высокодоходные домохозяйства. (В центральных же районах (моноцентрического города) земли мало и она слишком дорога для размещения малоквартирных отдельно стоящих домов, здесь концентрируется коммерческая, производственная деятельность и высокоплотные жилые образования, использующие земельный ресурс с максимальной выгодой).

Размерность и образ, свойственные описываемой модели жилища оказываются чуждыми групповому типу застройки многоэтажных микрорайонов. И, напротив, среди старых улочек со скверами и особняками такое жилище окажется наиболее уместно. Поэтому с морфологической точки зрения оно может удачно разместиться в реконструируемых исторических кварталах. То же относится и к современной индивидуальной малоэтажной застройке: здесь общий для обоих морфологических типов антропометрический масштаб может дополниться общностью социальной модели.

Представленная концепция создает канву для архитектурного построения высококомфортабельного эксклюзивного жилища. Но по своей сути – это универсальный инструментальный формирование качественной жилой архитектуры, независимо от ее социального адреса. Действительно, если оставить в стороне все, что связано с обусловленностью высоким доходом, в центре внимания оказываются жизнеспособные идеи: независимости функциональных процессов и рациональной композиционной организации планов, глубинной индивидуализации и приватности программы проживания, человеческого масштаба построек и связи жилища с природным окружением на разных уровнях.

Перспектива элитарности добавляет важный параметр к представлениям о городском жилище наших дней – она освещает идеал такого жилища, стремление к которому обеспечивает создание современной, дружелюбной человеку, жилой среды.

Поступила в редакцию 21 января 2009 г.

Дмитрий Владимирович Березин, кандидат архитектуры, доцент кафедры «Дизайн» ЮУрГУ.

Область научных интересов: архитектура городского жилища.

Контактные телефоны: 8-912-791-27-66, 261-23-21.

Dmitry Vladimirovich Berezin, candidate of science in architecture, Associate professor of the Design department of SUSU.

Scientific interests: architecture of urban inhabitation.

Contact phones: 8-912-791-27-66, 261-23-21.

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ И ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ ПРИ СОЗДАНИИ СХЕМ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

А.В. Бобылев, А.В. Малаев, Н.С. Рассказова

TOWN-PLANNING AND HYDROECOLOGIC APPROACHES IN THE LIGHT OF MUNICIPAL PLANNING SCHEMES DEVELOPMENT

A. Bobylev, A. Malaev, N. Rasskazova

В данной работе устанавливается зависимость между видами функционального использования территории водосбора и качеством воды в водных объектах с целью управления качеством воды на этапе территориального планирования.

Ключевые слова: градостроительное законодательство, земельное законодательство, территориальное планирование, функциональное зонирование, устойчивое развитие экосистем, водные ресурсы, водосборная площадь.

This research states the dependence between the catchment area land use and the water quality in order to manage the water quality at the stage of municipal planning.

Keywords: town-planning legislation, land-use legislation, municipal planning, zoning, ecosystems sustainable development, water resources, catchments area.

В настоящее время одним из основных направлений градостроительной деятельности на уровне муниципальных образований в составе субъектов Российской Федерации является создание схем территориального планирования. Основным общим нормативно-правовым актом (НПА), регулирующим отношения в данной сфере и имеющим статус федерального закона, является Градостроительный кодекс, который определяет состав территориального планирования:

- функциональные зоны;
- зоны планируемого размещения объектов капитального строительства для государственных и муниципальных нужд;
- зоны с особыми условиями использования территорий.

Под функциональным зонированием понимается установление границ территорий различного функционального назначения, при этом частным случаем является определение территорий с особыми условиями использования. При создании схем территориального планирования на уровне муниципальных образований, руководствуются:

- существующей структурой поселений;
- структурой расселения населения и объектов приложения труда;
- сложившейся структурой функционального использования земель.

При планировании территорий поселений, являющихся центрами хозяйственной деятельности, первоочередное значение имеет градостроительный подход: вся территория делится на зоны (зо-

нируется) согласно категориям и субкатегориям, принятым в градостроительной деятельности. Для поселений с развитой системой хозяйства и значительной численностью населения разрабатываются планы правового зонирования с учетом перспективного развития территории. Обязательным условием процесса территориального планирования является также обеспечение возможности устойчивого развития не только рассматриваемой территории, но и сопредельных территорий.

Устойчивое развитие территории предполагает сбалансированное протекание процессов антропогенной деятельности в природной среде, что, в свою очередь, призвано обеспечить условия для жизнедеятельности человека и рационального использования им природных ресурсов, достаточность и потребительские качества которых определяют перспективное развитие территории.

В проведенной нами работе оценивалось влияние пространственной структуры объектов хозяйственной деятельности на ведущий природный фактор развития территорий – водные ресурсы. Исследование проведено на примере изучения воздействия объектов хозяйственной деятельности в зоне водосбора реки Миасс на участке от Аргазинского до Шершневского водохранилища.

Проблема достаточности и качества водных ресурсов является актуальной для поселений, входящих в состав Челябинской агломерации (1,4 млн чел.) и промузла областного центра. Основной артерией водоснабжения является река Миасс и созданное на ней Шершневское водохранилище. В течение ряда многоводных лет, связанных с пре-

обладанием западного переноса воздушных масс, вопрос количества воды, необходимой для жизнедеятельности Челябинской агломерации, не являлся острым. Проблема увеличения объемов водоснабжения, на случай маловодных лет, частично решена строительством канала, соединившего Долгобродское водохранилище (р. Уфа) с Аргазинским. При этом остается открытым вопрос качества воды в Шершневском водохранилище, которое на сегодняшний день в целом отвечает требованиям СанПиН. Данные требования, а также ПДК характеризуют качество воды, которая используется для целей питьевого водоснабжения. Регламентация качества воды только этими показателями не может гарантировать обеспечения экологической устойчивости самого водного объекта.

Градостроительная роль Шершневского водохранилища состоит не только в водоснабжении, водохранилище также выполняет рекреационную функцию и играет эстетическую роль, как составляющая водного зеркала мегаполиса. Проблемы водохранилища обусловлены сочетанием его положения в каскаде, морфометрических, гидрологических и экологических характеристик (малое по объему, хорошо прогревается, является вторым в каскаде, испытывает влияние от рекреационной нагрузки и от текущей хозяйственной деятельности).

Качественный состав загрязнителей в Шершневском водохранилище формируют следующие стоки:

- с производственных территорий Миасса и Карабаша;
- с территории водосбора р. Миасс, в течении между Аргазинским и Шершневским водохранилищами (склоновый поверхностный сток);
- склоновый поверхностный сток с водосбора водохранилища.

Анализ состава загрязнителей в Шершневском водохранилище показывает наличие металлов, в т.ч. тяжелых, что свидетельствует о воздействии стока с производственных территорий. Не менее значимый вклад вносят азот и фосфор, что говорит о влиянии на рассматриваемый водный объект стока с территорий сельскохозяйственного назначения, а также территорий сельских населенных пунктов [1]. Так, например, нами ранее установлено, что для юго-восточного Зауралья, где водосборные площади водных объектов в основном заняты под сельхозугодия, также характерно наличие значительного количества азота и фосфора в водных объектах [2]. Исследование выноса растворенных в воде фосфора и азота с водосборных участков позволило установить его зависимость от величины поверхностного стока (100–200 мм) и агрономического фона. Наибольший вынос растворенного фосфора (0,9 кг/П/га) наблюдался на удобренных водосборах. На озимой и селитебной территориях вынос фосфора оказался в 1,5 раза (0,6 кг/П/га), а на зяби (при осенней вспашке) в 2 раза меньше (0,3 кг/П/га), чем на удобренном

водосборе. Полученные результаты свидетельствуют, что вынос биогенных элементов с сельхозугодий, расположенных на водосборных участках исследованных водных объектов, в значительной степени зависит от агрофона.

Целью настоящего исследования является установление зависимости между площадями, занимаемыми под ту или иную функцию хозяйственной деятельности, и качественным составом загрязнителей реки Миасс и Шершневского водохранилища. Соотношение площадей и расположение зон того или иного использования в рамках муниципалитета устанавливается при территориальном планировании. С этой позиции, проводимое в регионе территориальное планирование можно рассматривать как процесс непосредственного управления нагрузкой от хозяйственной деятельности на водные объекты. Управление должно осуществляться путем установления квот на размещение объектов хозяйственной деятельности на территории водосбора, а также регламентированием величин площадей под определенные виды деятельности, в зависимости от величины негативного воздействия на акваторию с единицы площади водосбора.

Первоочередному исследованию подвергался участок территории водосбора реки Миасс от Аргазинского до Шершневского водохранилища, а также водосбор Шершневского водохранилища.

В исследовании нами использовался ГИС-анализ, существующие методики расчета нагрузки на водный объект поверхностного стока, методы математической статистики. Исследование проводилось с использованием картографического материала открытого пользования (топографические карты и тематические данные), космических снимков (Ресурс-ДК, ALOS), также использованы данные полевых измерений. В качестве инструментальной применялась ГИС «ПАНОРАМА» (Настольная ГИС, версия 10.2). По топографическим картам 1:100 000 построением матрицы высот уточнялись границы территории водосбора р. Миасс и Шершневского водохранилища. Далее производилось зонирование территории согласно Земельному законодательству (межселенская территория) и Градостроительному законодательству (территория поселений).

В результате исследований были выделены следующие виды зон на межселенской территории (рис. 1):

- селитебные территории городских поселений;
- производственные территории городских поселений;
- территории садово-дачных поселков;
- сельские населенные пункты; земли сельского хозяйства;
- земли лесного фонда, особо охраняемых территорий и объектов.

Зонирование территорий поселений производилось по общим принципам или согласно имеющимся НПА.

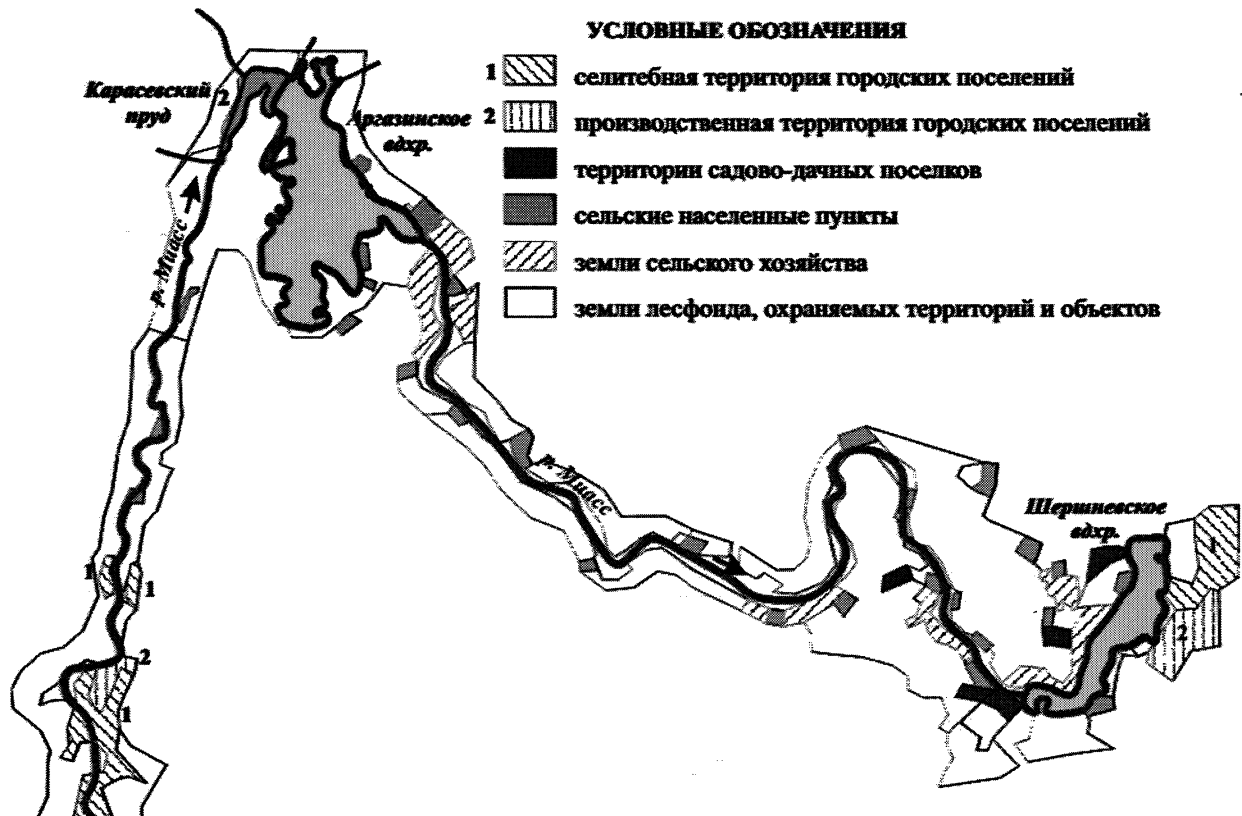


Рис. 1. Картограмма функционального зонирования территории водосбора р. Миасс

Совместное применение градостроительного и гидроэкологического подходов при создании схем территориального планирования муниципальных образований, позволяет оценить влияние (вклад) каждой функциональной зоны на загрязнение водных объектов. Эти зоны выделены нами в границах территории водосбора. Каждая из них оказывает определенное влияние на качество поверхностного стока и, как результат, на качество воды в водных объектах. На сегодня наиболее изученным является воздействие территорий сельскохозяйственного использования. Наша задача относительно земель сельскохозяйственного назначения состояла в актуализации данных: в нанесении границ сельхозугодий по тематическим данным (в случае их отсутствия – по топографическим), а также в уточнении границ сельхозугодий по космическим снимкам. Изменению функционального использования территорий, в т.ч. застройке сельскохозяйственных площадей в границах водосбора, уделено особое внимание при проведении зонирования. Отметим, что при проведении зонирования был учтен характер взаимодействия речного потока с основными физико-географическими факторами (рис. 2).

Характеристики воздействия объектов промышленности, транспорта и инфраструктур жизнеобеспечения устанавливаются на основе результатов анализа проб воды и донных отложений в частных и в замыкающем створе. В рамках изучения данного воздействия составлялась водохозяй-

ственная схема реки Миасс от истока до Шершневоградского водохранилища с учетом основных характеристик, определяющих качество стока.

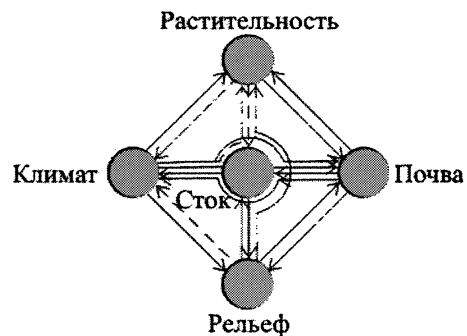


Рис. 2. Речной поток и основные физико-географические факторы

В результате анализа стока на водосборе с территорий населенных пунктов (преимущественно сельских), были установлены их границы (см. рис. 1). Сельскохозяйственные предприятия (фермы, станции сельхозтехники) включены в населенный пункт, если они расположены близко, либо непосредственно в структуре застройки. Если данные объекты расположены на значительном расстоянии от селитебного ядра населенного пункта, то они рассматриваются как объекты производства.

После первоначального зонирования (первое приближение) границы всех выделенных зон уточнены по материалам тематического картогра-

фирования, космическим снимкам и согласуются с водохозяйственной схемой реки. Зонирование составлено на основе принципов земельного законодательства, при этом внесены некоторые уточнения, подчеркивающие градостроительный подход. Отметим, что при анализе ситуации по космическим снимкам выявлено изменение функционального использования ряда территорий. Так, например, участки земли, использовавшиеся ранее в качестве сельскохозяйственных, в настоящее время оказались под малоэтажной застройкой сельского и дачного типа. Часть объектов на территории водосбора возводится с нарушением градостроительного и земельного законодательства.

Для выяснения нарушений положений градостроительного и водного кодексов применялся картографический метод. С этой целью на картографическом материале были построены водоохранные зоны. Анализ показал, что часть территорий с интенсивным хозяйственным использованием (территории поселений, земли сельского хозяйства) находятся в водоохраных зонах.

В таблице показано выявленное нами соответствие категорий земель (согласно проведенному зонированию) составу загрязнителей, характерных для стока с данной территории.

Соответствие категорий земель и состава загрязнителей, характерных для стока с данной территории (согласно проведенному зонированию)

№ п/п	Наименование территории	Состав загрязнителей
1	Селитебная территория городских поселений	СПАВ, нефтепродукты
2	Производственные территории городских поселений	Металлы, нефтепродукты, фенолы
3	Территории дачных поселков	Органические вещества, азот
4	Сельские населенные пункты	СПАВ, нефтепродукты
5	Земли сельского хозяйства	Фосфор, азот.
6	Земли инфраструктуры	СПАВ, металлы

В результате картометрических операций установлена связь между общей площадью зон на водосборе и составом загрязнителей в замыкающем створе:

$$Q_{\text{загр}} = \sum f_{\text{ст}}(F_i) + f_{\text{разб}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{загр}}$ – состав загрязнителя в замыкающем створе;

$f_{\text{ст}}(F_i)$ – характеристика стока (F_i – площадь рассматриваемой зоны в границах водосбора, см. таблицу);

$f_{\text{разб}}$ – характеристика разбавляющей способности водного объекта.

Авторами установлено, что различные элементы зонирования оказывают разное воздействие на состав загрязнителей в замыкающем створе. При этом количество загрязнителей с учетом зависимости (1) пропорционально площади территории, сток с которой содержит данный загрязнитель ($Q_{\text{загр}} \sim F_i$).

Установление количественного соотношения загрязнителей и площадей территорий различного пользования является задачей будущих исследований.

Таким образом, характеристики, которыми можно управлять, воздействуя тем самым на состав загрязнителей, является площадь той или иной функциональной зоны в границах водосбора водного объекта, а также собственно функциональное назначение самой зоны.

Эти характеристики должны обязательно учитываться при разработке схем территориального планирования муниципальных районов. Следует отметить и значительно большую устойчивость соединений металлов и углеводородов по отношению к фосфору и соединениям азота. Так установлено, что наличие фосфора и азота в р. Миасс и Шершневском водохранилище (соответствует гигиеническому ПДК, но превышает экологические в 2 раза) является следствием стока с сельскохозяйственных территорий на водосборе (40 % водосбора р. Миасс и 45 % водосбора Шершневского водохранилища). Содержание металлов (35 %) и нефтепродуктов (39 %) – результат стока с производственных территорий городских поселений (7 % водосбора).

При создании схем территориального планирования, авторами рекомендовано совместное использование градостроительного и гидроэкологического подходов, с целью управления качеством водных ресурсов на данной территории. Наряду с указанными подходами, авторами рекомендовано также применение бассейнового принципа, позволяющего учитывать интересы водопользователей, находящихся по течению реки ниже территории, на которую составляется схема территориального планирования. Использование бассейнового принципа при взаимной увязке схем территориального планирования будет способствовать устойчивому развитию каждого муниципального образования в составе региона. Также в качестве управляющих характеристик состояния объектов гидрографии авторами рекомендовано использовать размеры площадей, которые заняты определенными видами деятельности, в зависимости от величины негативного воздействия на акваторию с единицы площади водосбора с целью их регламентирования, а также установки квот на размещение объектов на территории водосбора.

Литература

1. Кривопалова, З.Ф. Методические рекомендации по выбору водоохраных мероприятий в

зоне сельскохозяйственного освоения [Текст]: метод. рекомендации / З.Ф. Кривопалова, Н.П. Фе-
дулова, Г.В. Танаева. – Екатеринбург: РосНИИВХ,
1986. – 29 с.

2. Малаев, А.В. Влияние ландшафтной струк-
туры водосборов озер юго-восточного Зауралья

на вынос биогенных веществ в водоемы
[Текст] / А.В. Малаев // Материалы всерос.
науч.-практ. конф. «Региональные эколого-
географические исследования и инновацион-
ные процессы в образовании». – Екате-
ринбург, 2006. – Ч. 1. – С. 121–124.

Поступила в редакцию 3 апреля 2009 г.

Бобылев Александр Владимирович, аспирант кафедры «Водоснабжение и водо-
отведение» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Область научных интересов: градостроительство, геоинформатика, гидрология.

Контактный телефон: 8-922-230-69-69.

Bobylev Alexander, post-graduate student of the Water Supply and Water Disposal de-
partment, South Ural State University, Chelyabinsk.

Scientific interests: town planning, GIS, hydrology.

Contact phone: 8-922-230-69-69.

Малаев Александр Владимирович, преподаватель кафедры «Общеобразователь-
ные дисциплины» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Область научных интересов: гидрология, технологии сельского хозяйства.

Контактный телефон: 8-904-811-18-73.

Malaev Alexander, lecturer of the General Education Disciplines department, South
Ural State University, Chelyabinsk

Scientific interests: hydrology, agricultural technologies.

Contact phone: 8-904-811-18-73.

Рассказова Надежда Степановна, доктор географических наук, профессор кафед-
ры «Водоснабжение и водоотведение» Южно-Уральского государственного универси-
тета, г. Челябинск.

Область научных интересов: градостроительство, геоинформатика, гидрология.

Контактный телефон: (351) 267-94-34.

Rasskazova Nadezda, doctor of geographical science, professor of the Water Supply
and Water Disposal department, South Ural State University, Chelyabinsk.

Scientific interests: town planning, GIS, hydrology.

Contact phone: (351) 267-94-34.

Экспертиза и оценка объектов недвижимости

УДК 528.7

ВЫБОР МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИЙ ПРИ НАЗЕМНОМ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.П. Ворошилов, Ю.А. Караченцев

CHOICE OF STATION LOCATION AT SURFACE LASER SCANNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

A.P. Voroshilov, Y.A. Karachentsev

Рассмотрены точностные характеристики процесса наземного лазерного сканирования для целей планирования местоположения станций и производства съемки зданий и сооружений сканирования.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование зданий и сооружений, лазерный сканер, планирование работ, геодезическая съемка.

The article considers the precision characteristics of the process of surface laser scanning for the purpose to plan the station location and to survey the buildings and constructions of scanning.

Keywords: surface laser scanning of buildings and constructions, laser scanner, scheduling, land-surveying.

Для съемки пространственного положения строительных объектов и их конструкций наиболее перспективны в настоящее время наземные лазерные сканирующие системы. Сканирование, управляемое специальной программой с компьютера, производится с высокой скоростью и большой плотностью снятых точек. Обеспечивает определение пространственных координат x , y , z с хорошей точностью. Это позволяет проводить необходимые измерения по облаку точек, импортировать данные в системы автоматизированного проектирования, выявлять деформации и смещения элементов конструкций.

При съемке сканер устанавливается на специальном устойчивом штативе на выбранных заранее станциях. Для сканирования сложных объектов применяют систему станций, что позволяет при последующей обработке объединить отдельные сканы в общее облако точек. На рис. 1 показаны шесть станций лазерного сканирования объекта: «Фасад северной трибуны стадиона Центральный» г. Челябинск.

Выбор местоположения станций относительно сканируемого объекта является одним из основных факторов подготовительных работ, определяющих точность сканов и их соответствие требованиям к геодезическим съемкам пространственных конструкций. Вместе с тем, к настоящему времени нет научно обоснованных рекомендаций по этому поводу.

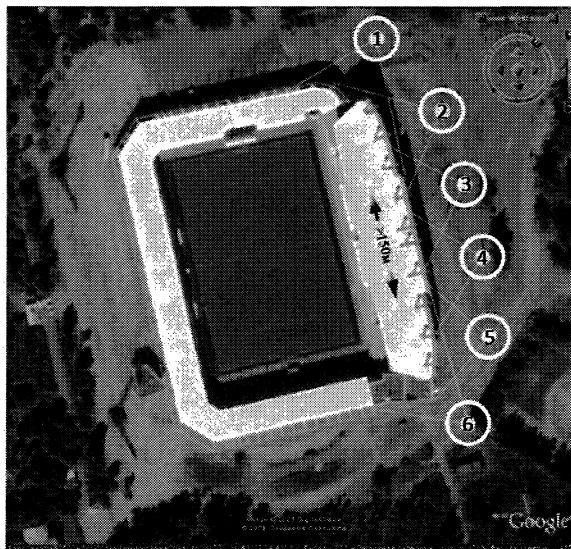


Рис. 1. Фасад северной трибуны

1. Факторы, влияющие на точность сканов

При выборе положения станций относительно снимаемого объекта необходимо учитывать комплекс факторов:

- точностные характеристики сканирования и последующего определения пространственных координат точек;
- удаление станций от снимаемых объектов;
- размеры зон сканирования по горизонтали и по вертикали;

- обеспечение зон перекрытий соседних сканов;
- увеличение детальности и точности сканирования на отдельных фрагментах зон;
- «видимость» и доступность для сканирования, отсутствие помех для сканирующего лазерного луча;
- коэффициент отражения снимаемой поверхности.

Учет этих факторов зависит от расположения объекта, его высоты, требуемой точности, загруженности деталями, наличия свободных площадей на прилегающих территориях. Однако при точных работах особое внимание должно быть уделено точностным характеристикам сканирования.

2. Точностные характеристики сканирования

В технических характеристиках сканеров обычно указывается точность измеряемого им расстояния, фиксации горизонтального и вертикального углов, определения пространственного положения точки на определенном расстоянии (например, на 50 м для сканеров Leica Geosystems). Каких-либо других оценок и расчетных формул не приводится.

Пространственные координаты снимаемой точки i объекта в заданной системе определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_i &= x_c + D_i \cos(\alpha_0 + \beta_i); \\ y_i &= y_c + D_i \sin(\alpha_0 + \beta_i); \\ z_i &= z_c + S_i \sin \nu_i + I_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_c, y_c, z_c – пространственные координаты станции в условной или геодезической системе координат; α_0 – дирекционный угол начального направления; S_i – наклонное расстояние; D_i – горизонтальное расстояние; β_i – горизонтальный угол между начальным и снимаемым на точку направлением луча сканера; ν_i – угол наклона луча сканера; I_c – высота сканера над точкой станции.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) планового положения точки i определяется на базе формул (1). Так как x_i и y_i являются функциями измеренных расстояний S и заданных углов поворота β_i сканирующего луча, то после дифференцирования выражений (1) получим:

$$\begin{aligned} m_{x_i}^2 &= m_{x_c}^2 + m_D^2 \cos^2 \beta_i + \left(\frac{D}{\rho}\right)^2 \sin^2 \beta_i m_\beta^2; \\ m_{y_i}^2 &= m_{y_c}^2 + m_D^2 \sin^2 \beta_i + \left(\frac{D}{\rho}\right)^2 \cos^2 \beta_i m_\beta^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_{x_c}, m_{y_c} – СКП координат станции; m_D – СКП измерения расстояний; m_β – СКП углов β_i ; $\rho = 206265''$.

Приведенные оценки выполнены для одиночных станций. При увязке стоянок прибора в одну

систему координат и объединении сканов в единые области точек, погрешности m_x и m_y возрастут из-за влияния погрешностей определения координат станций и погрешностей сшивки сканов. Вместе с тем, данные табл. 1 позволяют так подобрать местоположение станций прибора, чтобы координаты снятых точек были определены достаточно точно.

Таблица 1
Средние квадратические погрешности плановых координат при сканировании

D, м	m _x , мм			m _y , мм		
	углы отклонения γ			углы отклонения γ		
	0°	30°	60°	0°	30°	60°
10	0,6	2,1	3,5	4,0	3,5	2,0
20	1,2	2,2	3,5	4,0	3,5	2,1
30	1,8	2,5	3,6	4,0	3,6	2,2
40	2,4	2,9	3,7	4,0	3,7	2,3
50	3,0	3,3	3,8	4,0	3,8	2,5
60	3,6	3,7	3,9	4,0	3,9	2,7
80	4,8	4,6	4,2	4,0	4,2	3,1
100	6,0	5,6	4,6	4,0	4,6	3,6
120	7,2	6,6	5,0	4,0	5,0	4,1

При съемке здания применяется условная система координат (рис. 2), в которой ось x направлена по нормали к снимаемой поверхности объекта. В таком положении сканирующего луча (нормальный случай съемки) угол $\beta_i = 90^\circ$ и $\cos \beta_i = 0$, поэтому влияние СКП расстояний (m_D) на m_x и влияние СКП углов (m_β) на m_y будет в этом положении теоретически отсутствовать, что следует учитывать при выборе станций. При этом возрастает влияние m_β на m_x и m_y с увеличением отстояния D станции от снимаемого объекта. Существенное значение оказывает и величина угла γ , особенно на координату x .

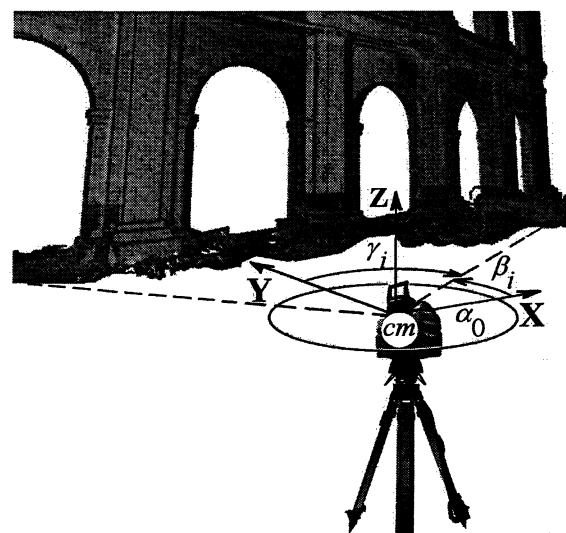


Рис. 2. Условная система координат

В сканерах Leica Geosystems по паспортным данным СКП $m_S = 4$ мм, а СКП углов равна 60 микрорadianам, что составляет $m_\beta = 12,4''$. Для этих параметров оценены по формулам (2) значения m_x и m_y при углах отклонения от нормали γ , равных 0° ; 30° ; 60° . Результаты такой оценки приведены в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что m_x и m_y при сканировании в общем случае определяются неравномерно и зависят от расстояния D и углов γ , что необходимо учитывать при выборе станции сканера.

Высотное положение отсканированной точки определяется относительно начального высотного направления, имеющего угол наклона ν_0 , по формуле

$$z_i = z_0 + S_i \sin \nu_i - S_0 \sin \nu_0, \quad (3)$$

где z_0 – координата z начального высотного направления при сканировании объекта.

На основе дифференцирования выражения (3) получим (при условии $m_{z_0} = 0$ и $\nu_0 = 0^\circ$) формулу оценки СКП высотного положения точки i

$$m_z^2 = m_S^2 \sin^2 \nu_i + \left(\frac{S_i}{\rho}\right)^2 \cos^2 \nu_i m_\nu^2 + \left(\frac{S_0}{\rho}\right)^2 m_\nu^2, \quad (4)$$

где m_ν – СКП определения сканером угла наклона сканирующего луча.

Оценка точности определения высотного положения точек при наземном лазерном сканировании для различных расстояний от станции и углов наклона луча, выполненная на основе выражения (4), приведена в табл. 2.

Таблица 2
Оценка СКП высотного положения отсканированных точек

$S, \text{ м}$	$m_z, \text{ мм, при углах наклона } \nu$			
	0°	30°	60°	90°
10	0,8	2,2	3,6	4,0
20	1,7	2,5	3,7	4,2
30	2,5	3,1	4,0	4,4
40	3,4	3,8	4,4	4,7
50	4,2	4,4	4,8	5,0
60	5,1	5,2	5,3	5,4
80	6,8	6,6	6,4	6,2
100	8,4	8,2	7,6	7,2
120	10,0	9,7	8,8	8,2

Анализ табл. 2 показывает, что наивысшая точность определения планового положения (0,8...3,0 мм) обеспечивается при коротких расстояниях S и малых углах наклона ν . Для расстояний $S \leq 50$ м m_x и m_y не превысят 4 мм, а m_z не превысит 5 мм.

Заключение

При выборе местоположения станций наземного лазерного сканирования рекомендуется учитывать точностные характеристики определения положения снимаемых точек на основе предрасчета СКП m_x , m_y и m_z по формулам (2) и (4), а также по данным табл. 1 и 2.

При высоких требованиях к точности сканирования следует сократить расстояние S и учитывать значения горизонтальных углов отклонения (γ) и углов наклона (ν) лазерного луча.

Поступила в редакцию 12 марта 2009 г.

Ворошилов Александр Прокопьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство» ЮУрГУ.

Контактный телефон: 2-67-93-75.

Voroshilov A.P., candidate of technical science, associate professor of the Urban Planning department of SUSU.

Contact phone: 2-67-93-75.

Караченцев Юрий Анатольевич, аспирант кафедры «Градостроительство» ЮУрГУ.

Контактный телефон: 8-904-304-16-69.

Karachentsev Y. A., post-graduate student of the Urban Planning department of SUSU.

Contact phone: 8-904-304-16-69.

Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, тел: (351) 266-66-66.

South Ural State University, 76 Lenin prospect, Chelyabinsk, Russia 454080, tel: (351) 266-66-66.

Теория расчета строительных конструкций

УДК 624.04:539.3:534

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА С ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева

TIME ANALYSIS OF ELEVATED GAS PIPELINE WITH ONE-WAY CONNECTIONS UNDER AERODYNAMIC INSTABILITY

A.N. Potapov, N.V. Degtyareva

Изложены некоторые вопросы теории динамического расчета дискретных диссипативных конструкций с односторонними связями. Дано практическое приложение этой теории к проблеме аэродинамической неустойчивости надземных газопроводов.

Ключевые слова: газопровод, колебание, резонанс, односторонняя связь, временной анализ, математическая модель.

Some points of the dynamic analysis theory of discrete dissipative systems with one-way connections are described. Application of this theory to the aerodynamic instability of elevated gas pipelines is shown.

Keywords: gas pipeline, oscillation, resonance, one-way connection, time analysis, mathematical model.

Односторонние связи (ОС) получили широкое распространение в инженерных конструкциях ввиду их высокой экономичности и надежности. Введение дополнительных связей, обладающих свойством включения-выключения, позволяет в сооружениях, подверженных динамическим воздействиям, ограничивать уровень колебаний. Изучение поведения конструкций с ОС требует разработки теории расчета систем с такими связями, которая пока еще несовершенна. Большая часть исследований на эту тему относится к теории статического расчета сооружений [1]. Учет влияния ОС осложняется тем, что исследуемая система становится конструктивно нелинейной [2]. Традиционные подходы [3] оказываются малоэффективными, их применение возможно лишь для упрощенных расчетно-динамических моделей (РДМ). Как правило, рассматриваются модели с одной-двумя степенями свободы. Существенным недостатком многих исследований является игнорирование влияния диссипативных сил в исходном дифференциальном уравнении движения. В связи с этим, характерно высказывание авторов [2]: «...говоря о программном обеспечении расчетов конструкций с односторонними связями и силами трения, ... нам неизвестны какие-либо разработки

промышленного применения, которые можно было бы рекомендовать к широкому практическому применению, хотя программы исследовательского характера, относящиеся к некоторым частным задачам, существуют».

В статье рассматривается задача вертикальных колебаний надземного газопровода при аэродинамической неустойчивости. Расчетная схема газопровода имеет вид неразрезной балки и представляет собой модель с односторонней связью (МОС), в которой ОС является гибким тросом (рис. 1, а). Эта связь устанавливается в среднем m -м пролете модели и выполняет функцию гасителя резонансных колебаний за счет циклического изменения расчетной схемы системы [4].

Положительные перемещения отсчитываются вверх от линии статического равновесия, т.е. в направлении увеличения взаимного расстояния между концами троса: $y_k(t) > 0$, где k – точка крепления ОС к трубе газопровода. При $y_k(t) < 0$, ОС выключена из работы, и система деформируется по схеме базовой модели (БМ) (рис. 1, б). При $y_k(t) \geq 0$, ОС находится в рабочем состоянии (включена в работу, рис. 1, в), в результате чего расчетная схема газопровода преобразуется в модель с дополнительной упругой связью (МДУС) жесткости r .

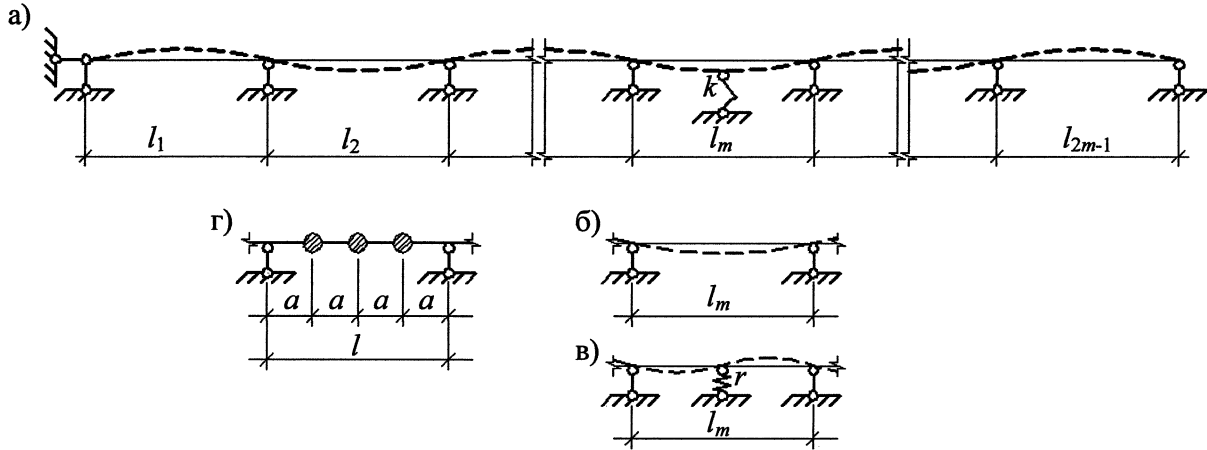


Рис. 1. Расчетная модель МОС: а – общий вид МОС; б – работа m -го пролета по БМ; в – работа m -го пролета по МДУС; г – дискретное моделирование

Динамическая модель газопровода имеет вид дискретной расчетной схемы с инерционными характеристиками (точечными массами), размещенными на границах элементарных участков a , на которые разбивается каждый пролет: $l = qa$, где q – число элементарных участков в пролете (рис. 1, г). Инерционные характеристики РДМ включают в себя собственный вес трубы и вес транспортируемого газа. Упругие характеристики РДМ строятся известными методами строительной механики.

Внешняя нагрузка при ветровом резонансе действует на цилиндрическую поверхность трубы газопровода как периодическая подъемная сила перпендикулярно направлению потока и моделируется гармоническим законом [5]: $P(t) = \sin(\vartheta t) P_0$, где $\vartheta = \text{diag}(\vartheta_1, \dots, \vartheta_n)$ – диагональная матрица круговых частот; P_0 – вектор амплитуд возмущающей нагрузки. Величина ϑ_k связана с числом вихрей f_k , сбегających с поверхности трубы за 1 секунду, формулой $\vartheta_k = 2\pi f_k$. Здесь $f_k = 0,22V/d$, d – диаметр трубы, V – скорость ветрового потока.

Заметим, что в общем случае (при неравномерном скоростном напоре) частота возмущающей нагрузки различна в различных узлах РДМ газопровода (ϑ – диагональная матрица). При равномерном скоростном напоре во всех узлах модели действует одна и та же круговая частота (ϑ – скалярная матрица).

Уравнение движения модели «газопровод – гаситель» как дискретной диссипативной системы (ДДС) записывается в следующей матричной форме:

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + K_j Y(t) = P(t) \quad (j = 1, 2), \quad (1)$$

где $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$, $C = C^T$, $K_j = K_j^T \in M_n(R)$ – вещественные и симметрические матрицы инерции, демпфирования и жесткости; $Y(t)$, $P(t)$ – векторы перемещений и внешних воздействий. Матрицы жесткости K_1 и K_2 строятся соответственно для БМ (рис. 1, б) и МДУС (рис. 1, в).

Уравнение движения собственных форм представляет собой характеристическое матричное квадратное уравнение [6]:

$$MS_j^2 + CS_j + K_j = 0 \quad (j = 1, 2). \quad (2)$$

При симметрических матрицах M , C , K_j решение уравнения (2) имеет вид корневой пары

$$S_{j(1,2)} = M^{-1}(-C + V_j \pm U_j)/2,$$

где $V_j = -V_j^T$, $U_j = U_j^T \in M_n$. При обычных условиях демпфирования инженерных конструкций диссипация – мала, вследствие чего $V_j = \text{Re } V_j$, $U_j = i \text{Im } U_j$ (i – мнимая единица). Поэтому матричные корни являются комплексно-сопряженными величинами

$$S_{j(1)} = S_j = M^{-1}(-C + V_j + U_j)/2,$$

$$S_{j(2)} = \bar{S}_j = M^{-1}(-C + V_j - U_j)/2.$$

После нахождения значений матриц V_j , U_j , отыскиваемых с помощью итерационного алгоритма, и построения фундаментальных решений $\Phi_j(t) = e^{S_j t}$ уравнение реакции модели записывается в виде интеграла Дюамеля ($t \geq t_i$) [6]

$$Y(t) = 2\text{Re} \{ \Phi_j(t - t_i) U_j^{-1} M^{-1} [-\bar{S}_j, Y_0 + \dot{Y}_0] + U_j^{-1} I(t) P_0 \}, \quad (3)$$

$$\text{где } I(t) = \int_{t_i}^t \Phi_j(t - \tau) \sin(\vartheta \tau) d\tau; \quad (4)$$

t_i – время включения или выключения ОС.

Исследование этого интеграла приводит к непрерывному уравнению Сильвестра

$$(S_j^T)^2 I(t) + I(t) \vartheta^2 = F(t), \quad (5)$$

правая часть которого определяется по формуле

$$F(t) = S_j^T [\Phi_j(t - t_i)^T \sin(\vartheta t_i) - \sin(\vartheta t)] + [\Phi_j(t - t_i)^T \cos(\vartheta t_i) - \cos(\vartheta t)] \vartheta \quad (j = 1, 2). \quad (6)$$

Для диссипативной системы решение уравнения (4) всегда единственно [6] и в случае неравномерного скоростного напора сводится к решению n систем

$$[(S_j^T)^2 + \vartheta_k^2 E] I_k(t) = F_k(t) \quad (k = 1, \dots, n).$$

Здесь $I_k(t)$, $F_k(t)$ – k -е столбцы матриц $I(t)$, $F(t)$; E – единичная матрица.

При постоянном скоростном напоре решение (4) принимает вид

$$I(t) = [(S_j^T)^2 + \vartheta^2]^{-1} F(t). \quad (7)$$

В процессе колебаний МОС система совершает переходы от одной расчетной модели к другой.

Они имеют квазипериодический характер, сопровождаются включением или выключением ОС и соответствуют критическим временным точкам $\dots, t_i, t_{i+1}, \dots$. Очевидно, что все изменения, касающиеся динамических параметров системы (жесткостные характеристики, частоты и формы собственных колебаний, начальные условия и т.д.), также будут происходить в моменты времени, соответствующие данным переходам. Внутри же интервалов $t \in [t_i, t_{i+1}]$ ($i = 1, 2, \dots$) параметры модели сохраняют постоянные значения. Это принципиально важный момент в особенностях работы конструктивно-нелинейной динамической системы.

Рассмотрим произвольный участок в процессе временного анализа с интервалами: $t \in [t_{i-1}, t_i]$ и $t \in [t_i, t_{i+1}]$. Пусть на интервале времени $[t_{i-1}, t_i]$ расчетная схема конструкции соответствует БМ (ОС выключена из работы). Тогда на следующем интервале $[t_i, t_{i+1}]$ система совершает колебания по МДУС (ОС включена в совместную работу системы). Приведем уравнения полной реакции системы на этих интервалах для случая постоянного скоростного напора в пределах всех пролетов расчетной модели.

Уравнения реакции БМ, согласно (3), на интервале времени $t \in [t_{i-1}, t_i]$ принимают вид:

$$\begin{aligned} Y(t) &= 2\operatorname{Re} \{Z(t)P_0\}, \quad \dot{Y}(t) = 2\operatorname{Re} \{S_1 Z(t)P_0\}, \\ Z(t) &= \Phi_1(t - t_{i-1})U_1^{-1}M[-\bar{S}_1 Y_0 + \dot{Y}_0] + \\ &+ [U_1(S_1^2 + \mathcal{G}^2)]^{-1}F(t)P_0. \end{aligned} \quad (8)$$

В этих уравнениях матричная функция $F(t)$ определяется из выражения (6) при $j = 1$ и замене индекса i на $i-1$.

Векторы начальных условий Y_0, \dot{Y}_0 в уравнениях реакции представляют собой соответственно перемещения и скорости узлов: $Y_0 = Y(t_{i-1}), \dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_{i-1})$, вычисленные в конце предыдущего интервала времени $[t_{i-2}, t_{i-1}]$, при деформировании системы по МДУС. Момент времени t_{i-1} характеризуется отключением ОС и переходом системы в режим колебаний БМ. При t_i происходит обратный переход к МДУС с одновременным включением ОС.

Уравнения реакции МДУС на интервале $t \in [t_i, t_{i+1}]$ имеют сходную запись с уравнениями (8):

$$\begin{aligned} Y(t) &= 2\operatorname{Re} \{Z(t)P_0\}, \quad \dot{Y}(t) = 2\operatorname{Re} \{S_2 Z(t)P_0\}, \\ Z(t) &= \Phi_2(t - t_i)U_2^{-1}M[-\bar{S}_2 Y_0 + \dot{Y}_0] + \\ &+ [U_2(S_2^2 + \mathcal{G}^2)]^{-1}F(t)P_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где матричная функция $F(t)$ строится из выражения (6) при $j = 2$. Векторы Y_0, \dot{Y}_0 вычислены в конце интервала времени $[t_{i-1}, t_i]$ по уравнениям реакции (8).

Для построения расчетной схемы алгоритма к уравнениям динамической реакции (8), (9), (6) необходимо присоединить условия включения-выключения ОС, описывающие переход расчетной модели из одного состояния в другое. Данные условия имеют вид неравенств и позволяют вычислять критические временные точки в ходе шагового процесса.

Пусть Δt – шаг интегрирования в процессе вычисления динамической реакции системы. Тогда включение ОС в работу (в момент перехода от БМ к МДУС через временную точку t_i) представляется кинематическими условиями:

$$y_k(t) < 0, \quad y_k(t + \Delta t) \geq 0. \quad (10)$$

Условие выключения ОС из работы при обратном переходе моделей через критическую точку t_{i+1} имеет вид статических неравенств:

$$N(t) \geq 0, \quad N(t + \Delta t) < 0. \quad (11)$$

В приведенных условиях: $y_k(t)$ – перемещение точки k крепления ОС к трубе надземного газопровода, $N(t)$ – усилие в упруго-податливой ОС (тросе). При работе МДУС трос испытывает натяжение и поэтому усилие в ОС всегда имеет положительный знак (растяжение). Условием перехода от МДУС к БМ является смена знака усилия в дополнительной связи на противоположный: поскольку сжатие в гибком тросе невозможно, это соответствует отключению ОС.

Система уравнений (8), (9), (6) и комплекс условий, включающих кинематические (10) и статические (11) неравенства, представляют собой математические модели нелинейного расчета системы с ОС в рамках теории временного анализа. В процессе решения задачи весь временной участок интегрирования разбивается на такие интервалы $[t_i, t_{i+1}]$ ($i = 1, 2, \dots$), внутри которых реакция в ОС либо положительна, либо равна нулю. Во временных точках t_i, t_{i+1} , определяемых в ходе шагового процесса, расчетная модель переходит из одного состояния в другое. Этот переход учитывается сменой начальных условий – начальных перемещений и начальных скоростей узлов модели, – вычисляемых в конце предыдущего интервала времени. Это позволяет проводить стыковку уравнений реакции моделей в каждом цикле и, тем самым, обеспечивать непрерывность движения динамической системы на заданном интервале времени. Таким образом, временной анализ конструктивно-нелинейной системы сводится к последовательности многократно повторяющихся линейных решений для циклически меняющихся упругих систем.

Численная реализация задачи. В качестве приложения рассмотрим пример анализа колебаний надземного газопровода высокого давления Кузнецкое-Байрамгулово (труба $\varnothing 219$ мм, $l = 15$ м). Для параметров модели газопровода: $m = 11$, $q = 6$ число степеней свободы системы составило $n = m(q - 1) = 55$.

На рис. 2, а приведена осциллограмма перемещений центрального сечения среднего пролета БМ газопровода: $y_k(t)$ (при $k = 28$, см. рис. 1, б). Решение этой задачи получено при условии рассеяния энергии, учитываемого комбинированной моделью Рэлея: $C = \alpha M + \beta K$, где коэффициенты $\alpha = 0,3388$ и $\beta = 0,001181$ определялись в соответствии с рекомендациями ПК SAP2000 и указаниями [7]. Для сравнения результатов приведена анало-

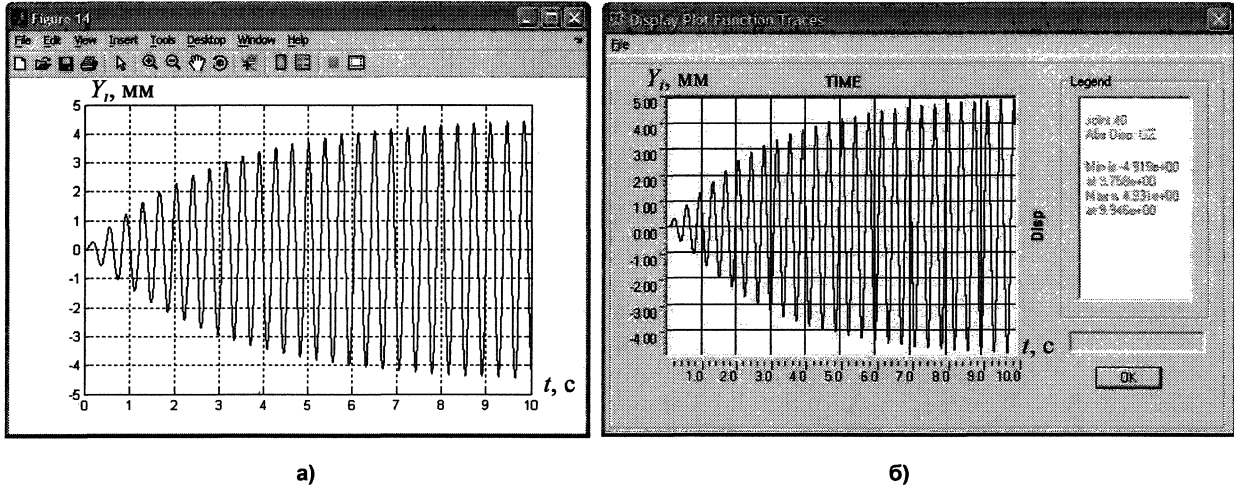


Рис. 2. Осциллограммы перемещений центральных сечений пролетов БМ, полученные методом временного анализа (а) и МКЭ в ПК «SAP 2000» (б)

гичная осциллограмма, полученная для тех же условий демпфирования на основе МКЭ в ПК SAP 2000 (рис. 2, б), из которой следует, что относительная погрешность на интервале 10 секунд не превышает 0,5 %.

В последующем анализе учет внутреннего сопротивления колебаниям проведен с помощью модели непропорционального демпфирования [6]:

$$C = KT, \quad (12)$$

где $T = \text{diag}(\gamma/w_1, \dots, \gamma/w_n)$; w_k – частота собственных колебаний консервативной системы; $\gamma = \delta/\pi$ (δ – логарифмический декремент колебаний).

Для несимметрической матрицы демпфирования (12) существует возможность преобразования уравнения (1), с целью симметризации его матричных коэффициентов. Для этого умножим обе части (1) слева на матрицу MK_j^{-1} :

$$\tilde{M}_j \ddot{Y}(t) + \tilde{C}_j \dot{Y}(t) + \tilde{K}Y(t) = \tilde{P}(t), \quad (13)$$

$$\tilde{M}_j = MK_j^{-1}M, \quad \tilde{C}_j = MT_j,$$

$$\tilde{K} = M, \quad \tilde{P}(t) = MK_j^{-1}P(t).$$

Практическая реализация математических моделей на основе уравнения (13) протекает по предложенной выше расчетной схеме с тем отличием, что в уравнениях реакции системы (8), (9) матрица $F(t)$ будет иметь вид

$$F(t) = S_j^T [\Phi_j(t-t_i)^T MK_j^{-1} \sin(\vartheta t_i) - MK_j^{-1} \sin(\vartheta t)] + [\Phi_j(t-t_i)^T MK_j^{-1} \cos(\vartheta t_i) - MK_j^{-1} \cos(\vartheta t)] \vartheta \quad (j = 1, 2). \quad (14)$$

Для принятых рабочих параметров модели резонансные колебания РДМ газопровода по 1-й собственной форме возникают при скорости ветрового потока $v = 2,952$ м/с. Численная реализация задачи проводилась в математической системе MatLab. Шаг временного анализа в стационарных режимах составлял от $\Delta t = 0,01$ с до $\Delta t = 0,02$ с. В переходных режимах шаг интегрирования на интервалах поиска критических точек варьировался до 10^{-7} с.

Приведенные графики резонансных амплитуд

в БМ и МОС доказывают эффективность работы ОС в качестве ограничителя резонансных колебаний (рис. 3). В наиболее удаленном от устройства ОС 1-м пролете максимальные виброперемещения центрального узла $y_3(t)$ не превышают 1 см (при $t = 9$ с) и больше уже не увеличиваются с течением времени, в отличие от той же величины в БМ. Наибольший эффект от гашения колебаний возникает в среднем пролете, где установлено устройство ОС. В узле крепления устройства максимальная амплитуда виброперемещений составляет $y_{28}(t) = 0,374$ см (в момент времени $t = 12,7$ с), что почти в 3 раза меньше максимальных значений $y_3(t)$ в той же модели 1-го пролета. Главное же преимущество МОС перед БМ состоит в том, что резонансные амплитуды на всей временной оси больше не возрастают. При работе МОС происходит периодическое изменение жесткости системы и вместе с нею – ее частотных спектров. Это позволяет в каждом цикле отстраивать систему от резонанса, а в конечном итоге управлять резонансными амплитудами, ограничивая их значения до безопасного уровня.

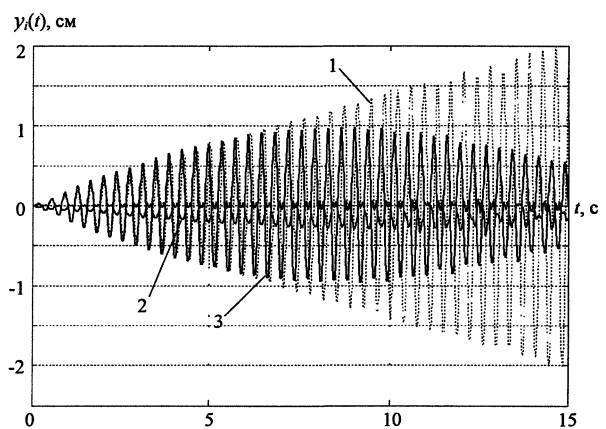


Рис. 3. Осциллограммы перемещений центральных сечений 1-го (крайнего) и 6-го (среднего) пролетов РДМ: 1 – $y_3(t)$ в 1-м, $y_{28}(t)$ в 6-м пролетах БМ; 2 – $y_{28}(t)$ в 6-м пролете МОС; 3 – $y_3(t)$ в 1-м пролете МОС

Поведение системы в переходных режимах показано на рис. 4. Осциллограммы перемещений узла крепления стального троса (устройства гашения колебаний) построены при различных его жесткостях. При циклической смене расчетных моделей в момент натяжения стального троса происходит вынужденный и резкий переход кинетической энергии в потенциальную. Причем этот переход происходит гораздо быстрее, чем в БМ, и определяется десятками (и даже сотыми) долями от периода основного тона. С увеличением жесткости ОС, обмен энергиями становится более интенсивным и коротким по времени. Поэтому зона локализации ОС характеризуется уплотненным режимом колебаний с преобладанием в реакции системы высших гармоник. Это, в частности, хорошо видно на примере кривой 3 виброперемещений $y_{28}(t)$, построенной для случая погонной жесткости $EA/l_m = 10^8$ кН/м, где l_m – длина троса (рис. 4).

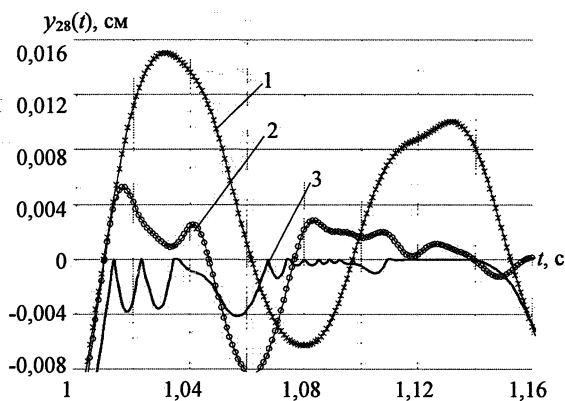


Рис. 4. График виброперемещений $y_{28}(t)$ центрального сечения МОС в узле крепления стального троса при различной жесткости EA/l_m : 1 – 10^3 кН/м; 2 – $5 \cdot 10^3$ кН/м; 3 – 10^8 кН/м

Эффективность работы системы во многом зависит от правильного подбора жесткости ОС. Слишком малая жесткость связи оказывает слабый эффект на гашение резонансных амплитуд (кривая 1, рис. 4). Слишком большая жесткость вызывает резкое возрастание ударной нагрузки на стальной трос и поверхность трубы в каждом цикле колебаний, что понижает надежность и долговечность конструкции (кривая 3). При оптимальном выборе жесткости ОС ($EA/l_m = 5 \cdot 10^3$ кН/м, стальной канат $\varnothing 11,5$ мм; кривая 2) переход от БМ к МДУС происходит «мягче» по сравнению с вариантом высокой жесткости ОС (кривая 3), в результате чего снижаются продольные усилия в тросе. В то же время, при таком выборе жесткости, перемещения точки крепления связи относительно невелики по сравнению с вариантом модели малой жесткости ОС (кривая 1), что заметно сказывается на повышении эффекта гашения опасных колебаний.

Более полную картину нелинейной работы системы иллюстрируют осциллограммы парамет-

ров динамической реакции на рис. 5. В режиме колебаний МДУС перемещение $y_{28}(t)$ всюду > 0 (кривая 1, рис. 5), поэтому стальной трос на данных временных интервалах испытывает растяжение (вертикальные пики на кривой 2). Так как в момент натяжения троса кинетическая энергия движения внезапно трансформируется в потенциальную (упругую) энергию, то одновременно с появлением растягивающих усилий в тросе происходит резкая активизация восстанавливающих сил – $R_{28}(t)$ (вертикальные пики на кривой 3).

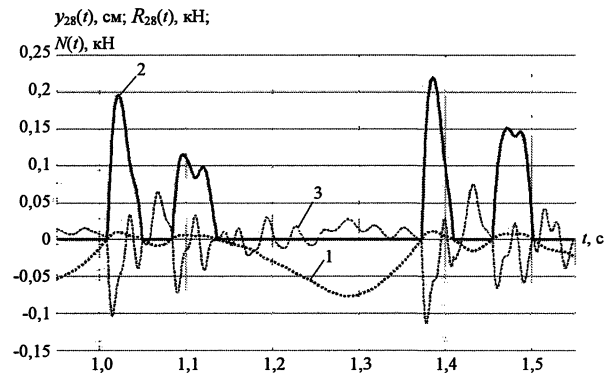


Рис. 5. Осциллограммы параметров динамической реакции в центральном узле среднего пролета МОС при жесткости $EA/l_m = 2 \cdot 10^3$ кН/м: 1 – виброперемещение $y_{28}(t)$; 2 – $N(t)$ растягивающие усилия в стальном тросе; 3 – восстанавливающие силы $R_{28}(t)$

Представленные результаты свидетельствуют о широких возможностях временного анализа в динамических системах с конструктивной нелинейностью. Разработанные математические модели нелинейного расчета делают предложенный подход в высокой степени поддающимся алгоритмизации и доступным к реализации прикладных задач динамики сооружений, включая обширный класс динамических задач с нестационарными процессами.

Литература

1. Рабинович, И.М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями / И.М. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1975. – 145 с.
2. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.
3. Бакулин, В.Н. Численное моделирование механических систем с односторонними ограничениями характеристик динамического взаимодействия их частей / В.Н. Бакулин, Г.Н. Колесников, М.И. Раковская – <http://www.nkfi.ru/conference/2006/9.doc>
4. Пат. на полезную модель 66000 Российская федерация, МПК⁷ F16L55/033, F16L3/00. Устройство для гашения резонансных колебаний трубопровода / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева, Е.В. Бе-

Теория расчета строительных конструкций

режкова, А.Е. Павленко. – № 2007109081/22; заявл. 12.03.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24. – 3 с.

5. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Наука, 1967. – 420 с.

6. Потапов, А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационар-

ных воздействиях / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.

7. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. РТМ 38.001–94. – М. – 1995.

Поступила в редакцию 26 февраля 2009 г.

Потапов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика» ЮУрГУ.

Область научных интересов: временной анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных процессах.

Контактный телефон: 8 (351) 267-90-00, e-mail: alnipo@mail.ru

Alexander N. Potapov, doctor of technical science, professor, head of the Structural Mechanics department of South Ural State University.

Scientific interests: time analysis of the discrete dissipative systems under the nonstationary processes.

Contact phone: 8 (351) 267-90-00, e-mail: alnipo@mail.ru

Дегтярева Наталья Владимировна, аспирант кафедры «Строительная механика» ЮУрГУ.

Область научных интересов: аэродинамическая неустойчивость надземных газопроводов.

Контактный телефон: 8 (351) 267-90-00, e-mail: degtnata@yahoo.com

Nataliya V. Degtyareva, post-graduate student of the Structural Mechanics department of South Ural State University.

Scientific interests: the aerodynamic instability of elevated gas pipelines.

Contact phone: 8 (351) 267-90-00, e-mail: degtnata@yahoo.com

Строительные материалы, изделия и конструкции

УДК 666.972.162+666.952

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКАМИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО ПЛАСТИФИКАТОРА

Е.А. Гамалий, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар

STRUCTURE AND PROPERTIES OF CEMENT STONE WITH ADMIXTURES OF SILICA FUME AND POLYCARBOXYLATE PLASTICIZING AGENT

E.A. Gamaliy, B.Y. Trofimov, L.Y. Kramar

Представлены результаты исследования влияния микрокремнезема и Glenium Sky 505 на структуру и свойства цементного камня. Показана целесообразность совместного применения микрокремнезема и суперпластификатора для получения материалов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: модифицирование бетонов, поликарбоксилаты, активные минеральные добавки, гидратация цемента.

The article gives the results of research of influence of silica fume and Glenium Sky 505 upon structure and properties of cement stone. The appropriateness of joint usage of silica fume and super plasticizing agent for getting materials with high performance specification is shown.

Keywords: retrofitting of concrete, polycarboxylate, active mineral admixtures, gradation of concrete.

В настоящее время проблемы повышения прочности и долговечности бетона успешно решаются путем его модифицирования. Управление структурообразованием в цементных системах с помощью добавок позволяет получать самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с низкой проницаемостью и высокой коррозионной стойкостью.

Среди применяемых в технологии бетона добавок особое место занимают две большие группы – активные минеральные добавки (АМД) и добавки-пластификаторы. Использование высокоэффективных АМД способствует повышению прочности, стойкости при химической и морозной агрессии и экономии цемента в производстве бетона. Известно, что применение микрокремнезема позволяет получать цементную матрицу с высокой плотностью и водонепроницаемостью, способствует ускорению гидратации клинкерных минералов, приводит к формированию в цементном камне стабильных высокопрочных структур из низкоосновных гидросиликатов кальция [1, 2].

Высокую водопотребность цементных компо-

зиций с АМД можно нивелировать введением суперпластификаторов, позволяющих снизить количество воды затворения на 20–30 % при сохранении подвижности бетонной смеси.

Новое поколение суперпластификаторов, полученных на базе поликарбоксилатных эфиров, обеспечивает высокую подвижность и связность бетонных смесей при низких значениях водоцементного отношения, длительную сохраняемость их свойств. Для поликарбоксилатов характерно наличие анионной основной и гидрофобных незаряженных боковых цепей. Вид и длина основной, а также длина и частота расположения боковых цепей могут меняться в широком диапазоне, что позволяет эффективно управлять процессами адсорбции этих пластификаторов на зернах вяжущего [3].

Добавки на поликарбоксилатной основе отличаются большим разнообразием и до сих пор изучены недостаточно. Многочисленные исследования зарубежных ученых содержат противоречивые данные. Так, В. Lothenbach, F. Winnefeld, R. Figi отмечают, что пластифицирующий эффект и за-

План-матрица эксперимента и сроки схватывания цементного теста

№ состава	X, кол-во МК, %		Y, кол-во СЭП, %		Начало схв., ч-мин	Конец схв., ч-мин
	код	знач.	код	знач.		
1	-1	0	-1	0	1-20	2-40
2	-1	0	0	0,6	1-40	3-30
3	-1	0	+1	1,2	1-45	3-35
4	0	6	+1	1,2	1-45	3-40
5	+1	12	+1	1,2	1-35	4-10
6	+1	12	0	0,6	1-50	4-00
7	+1	12	-1	0	1-20	3-40
8	0	6	-1	0	1-20	3-15

медление гидратации цемента в присутствии поликарбоксилатных добавок обусловлены электростатически-стерическим механизмом их действия, а не химическим взаимодействием с ионами Ca^{2+} , Na^+ , K^+ [4]. К. Koizumi, Y. Umemura, N. Tsuyuki, напротив, считают, что молекулы поликарбоксилатов образуют метастабильные комплексы с ионами Ca^{2+} , что вызывает понижение основности образующихся гидросиликатных фаз [5]. По данным J. Plank, G. Bassioni, Z. Dai и др., поликарбоксилаты при взаимодействии с C_3A встраиваются в структуру формирующихся гидратов с образованием стабильных органо-минеральных фаз [6]. В результате, в литературе нет исчерпывающей информации о влиянии поликарбоксилатных пластификаторов на процессы гидратации цемента и формирование структуры цементного камня.

Получение востребованных в настоящее время самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками требует применения высокоэффективных пластифицирующих и тонкодисперсных активных минеральных добавок.

На кафедре «Строительные материалы» ЮУрГУ проведены исследования с целью изучения влияния комплексной добавки «поликарбоксилатный суперпластификатор + микрокремнезем» на процессы гидратации цемента и формирование структуры и свойств цементных композиций.

В работе использовали цемент ПЦ 500-Д0 ГОСТ 10178 производства ОАО «Невьянский цементник» следующего минералогического состава: C_3S – 54-60%; C_2S – 17-18%; C_3A – 7-8%; C_4AF – 13,5%. В качестве модифицирующих добавок применяли универсальный суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира (СЭП) Glenium Sky 505 производства концерна BASF (Германия) и микрокремнезем (МК) конденсированный МК-65 производства ОАО «ЧЭМК» по ТУ 5743-048-02495332.

Для достижения цели был спланирован и реализован двухфакторный эксперимент. Количество микрокремнезема варьировали от 0 до 12%, а пластифицирующей добавки – от 0 до 1,2% от массы цемента. В качестве откликов оценивали: нормальную плотность, сроки схватывания цементного теста, прочность цементного камня при сжатии в возрасте 1, 3 и 28 суток. Прочность при сжатии

определяли на образцах-кубах с ребром 20 мм, изготовленных из теста нормальной плотности и твердевших в воде.

Фазовый состав цементного камня изучали методами дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА) анализов, с помощью электронной микроскопии и локального микроанализа. Закристаллизованность оценивали по удельной поверхности гидратных фаз, определяемой по адсорбции паров воды.

План-матрица эксперимента и значения сроков схватывания цементного теста приведены в таблице. Из полученных данных видно, что сроки схватывания цементных композиций с добавками увеличиваются с повышением содержания СЭП. Начало схватывания замедляется до получаса, конец схватывания – на час-полтора.

В результате математической обработки изменения нормальной плотности цементного теста в области варьируемых факторов были получены следующие зависимости (рис. 1):

$$НГ(x, y) = 19,67 + 0,84x - 3,94y + 0,76x^2 + 1,25y^2 - 1,67xy. \quad (1)$$

Коэффициент Фишера F составил при этом 0,3.

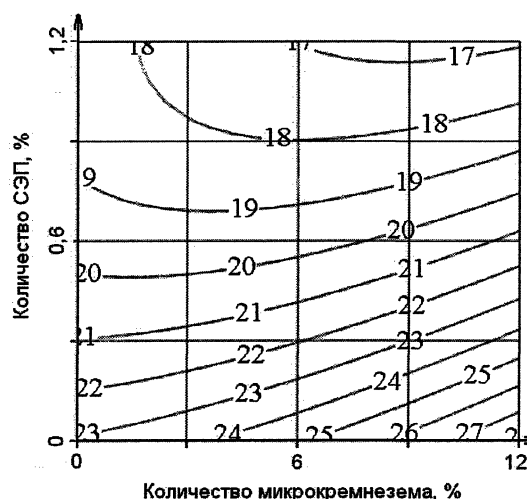


Рис. 1. Зависимость* нормальной плотности (%) от дозировок МК и СЭП

* – адекватность математических моделей подтверждается критерием Фишера, который во всех случаях меньше табличных значений.

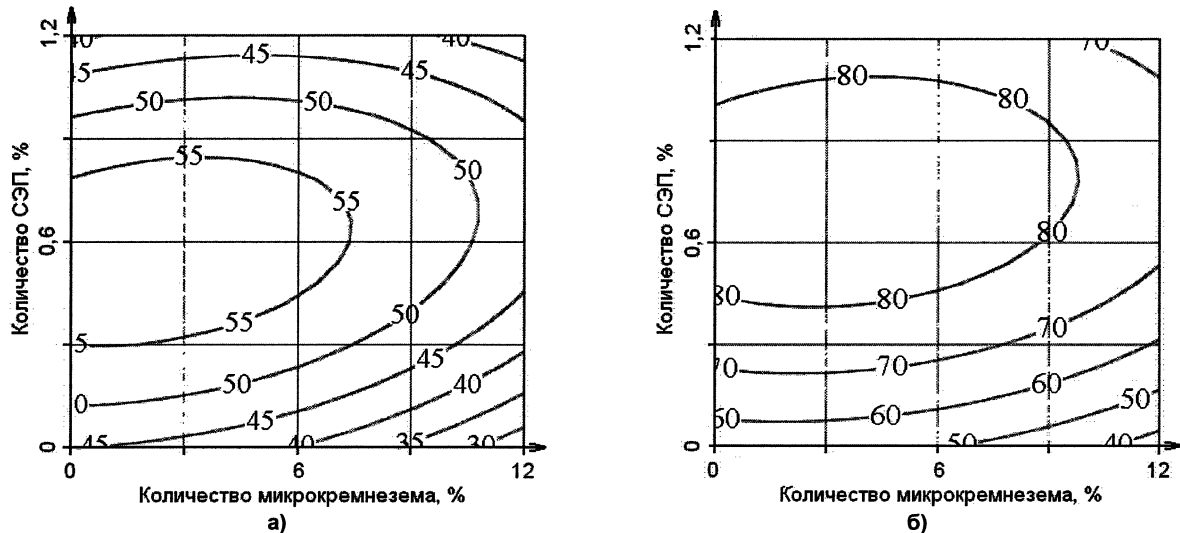


Рис. 2. Зависимость* прочности цементного камня при сжатии (МПа) в возрасте 1 (а) и 3 (б) сут от дозировок МК и СЭП

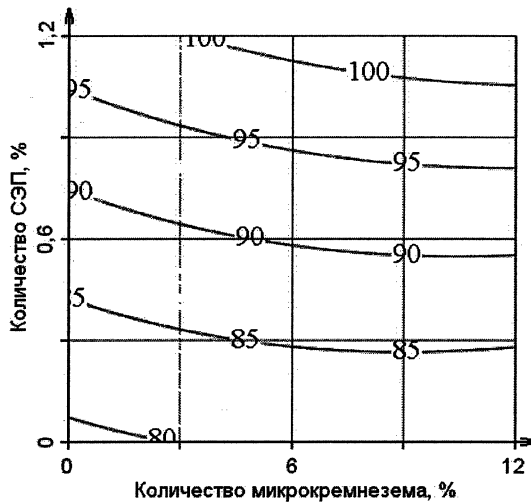


Рис. 3. Зависимость* прочности цементного камня при сжатии (МПа) в возрасте 28 сут от дозировок МК и СЭП

При расчете нормальной плотности учитывалось количество воды, содержащееся в растворе СЭП 30 % концентрации, добавка микрокремнезема включалась в состав цемента.

Полученные результаты показывают, что совместное введение СЭП и МК позволяет снизить нормальную плотность цементного теста на 26 % по сравнению с бездобавочным, тогда как применение только 1,2 % СЭП помогает сократить количество воды затворения лишь на 19 %. Это, вероятно, связано с дополнительным участием пластифицированных частиц МК в дефлокуляции агрегатов из цементных зерен, что приводит к повышению пластичности цементного теста.

Изменения прочности при сжатии цементного камня в разные сроки твердения показаны на рис. 2, 3.

$$R_{сж}^1(x, y) = 56,38 - 5,11x + 1,13y - 4,08x^2 - 15,33y^2 + 4,09xy, \quad F = 1,2; \quad (2)$$

$$R_{сж}^3(x, y) = 83,98 - 5,91x + 11,88y - 6,16x^2 - 21,24y^2 + 2,99xy, \quad F = 0,9; \quad (3)$$

$$R_{сж}^{28}(x, y) = 90,33 + 1,61x + 10,42y - 1,03x^2 + 0,7y^2 + 1,05xy, \quad F = 1,7. \quad (4)$$

Анализ изменения фазового состава цементного камня методом ДТА выявил, что на всех дериватограммах присутствуют эндоэффекты при $\sim 130^\circ\text{C}$ и $\sim 700^\circ\text{C}$, связанные с дегидратацией смеси гидросиликатов кальция (ГСК) разной основности, а также эндоэффект при $\sim 480^\circ\text{C}$, соответствующий дегидратации портландита. По потерям массы при 480°C проведен расчет содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне (рис. 4).

$$P^1(x, y) = 5,195 - 0,76x - 1,482y + 0,005x^2 + 0,35y^2 + 0,27xy, \quad F = 2,8; \quad (5)$$

$$P^{28}(x, y) = 6,078 - 1,89x - 1,337y + 0,687x^2 + 0,707y^2 + 0,563xy, \quad F = 0,7. \quad (6)$$

Полученные данные подтверждают предположение, что введение СЭП тормозит процесс гидратации цемента. Это выражается в замедлении образования портландита в цементном камне даже в поздние сроки твердения. МК снижает количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за счет его связывания в низкоосновные ГСК, чем ускоряет процесс гидратации.

На дериватограммах композиций, включающих микрокремнезем, при температуре $\sim 880^\circ\text{C}$, как правило, проявлялся экзоэффект, связанный с переходом обезвоженных низкоосновных ГСК в воластонит. По площади экзоэффекта можно косвенно судить об их количестве. Значения площади эффекта при $\sim 880^\circ\text{C}$ в композициях, содержащих 12 % МК, при разной дозировке СЭП в возрасте 1 и 28 суток приведены на рис. 5. Ошибка определения не превышала 5 %.

Приведенная зависимость указывает на снижение величины экзоэффекта с увеличением содержания пластифицирующей добавки, что вызвано повышением основности образующихся ГСК. Это может быть обусловлено замедлением пуццоланической реакции вследствие адсорбции СЭП на частицах МК и цемента. Уменьшение величины

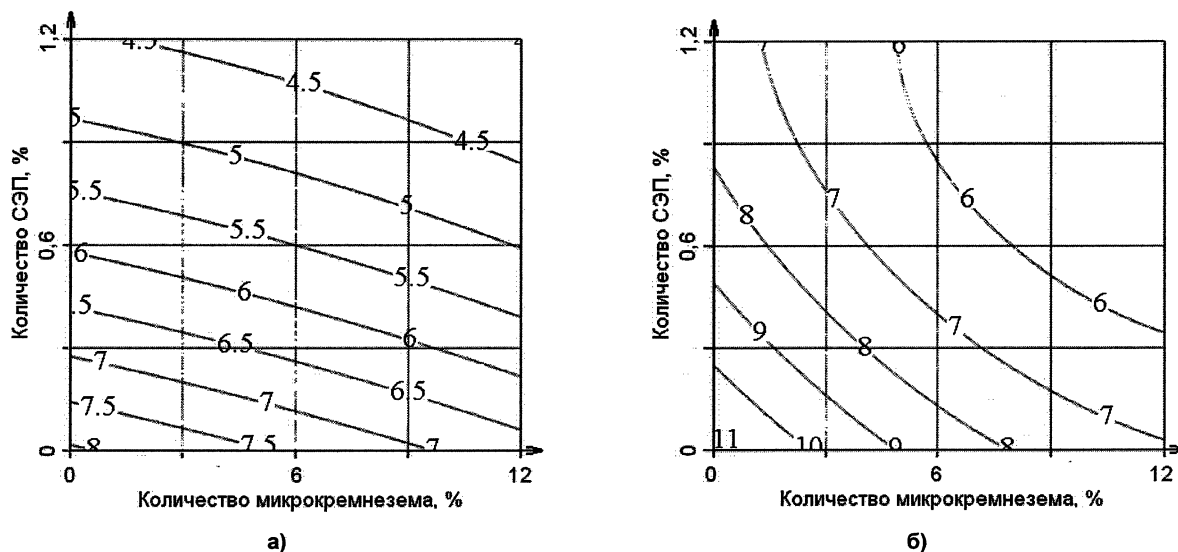


Рис. 4. Зависимость* содержания портландита (%) от дозировок МК и СЭП в возрасте 1 (а) и 28 (б) сут

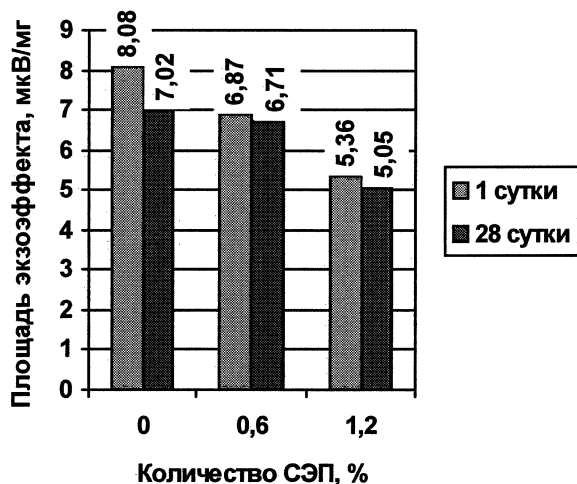


Рис. 5. Площадь экзотермического эффекта при ~880 °C в композициях с МК=12 %

экзотермического эффекта с течением времени связано с тем, что активное образование низкоосновных ГСК происходит в начальный период гидратации в жидкой фазе, предполагающей равномерное распределение составляющих в объеме. Дальнейшая гидратация цемента в затвердевшем материале сопровождается, как правило, образованием ГСК повышенной основности, что приводит к некоторому снижению доли низкоосновных ГСК в цементном камне в марочном возрасте. В композициях, содержащих СЭП, гидратация цементных минералов замедляется, чем и вызвана относительная стабильность величины экзотермического эффекта во времени. К 28 суткам содержание низкоосновных ГСК в композиции без СЭП и с 0,6 % СЭП находится практически на одном уровне.

Исследования, проведенные методом РФА, подтвердили, что состав цементного камня в возрасте 1 и 28 суток представлен слабозакристаллизованной C-S-H-фазой с $d/n = 0,307; 0,280; 0,183$ нм,

портландитом с $d/n = 0,493, 0,311, 0,263, 0,193, 0,179, 0,169, 0,149$ нм и непрореагировавшим алитом с $d/n = 0,304, 0,278, 0,275, 0,261$ нм. Интенсивность отражений портландита хорошо согласуется с данными ДТА: наименьшие значения отмечаются в области высоких дозировок СЭП и МК.

Изменения удельной поверхности гидратных фаз в возрасте 28 суток по адсорбции паров воды при относительной влажности воздуха 40 % представлены на рис. 6.

$$S_{уд}^{28}(x, y) = 109,75 + 22,5x - 10,67y + 0,25x^2 + 7,75y^2 - 15,25xy, \quad F = 4,8. \quad (7)$$

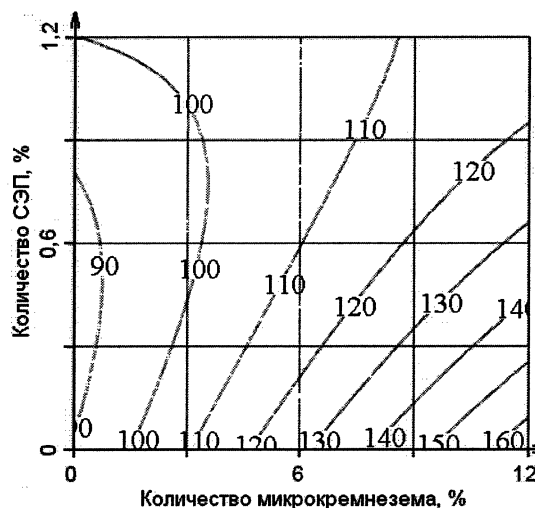


Рис. 6. Зависимость* удельной поверхности цементного камня (m²/r) от дозировок МК и СЭП в возрасте 28 сут

Полученные результаты указывают на увеличение удельной поверхности гидратных фаз при повышении в цементном камне содержания МК.

Введение СЭП снижает удельную поверхность композиций, включающих МК, что подтверждает предположение об увеличении основности ГСК в его присутствии.

Изучение сколов цементного камня в электронном микроскопе и определение элементного химического состава наиболее характерных новообразований с помощью рентгеновского микроанализатора позволило сделать следующие выводы:

– структура бездобавочного цементного камня неоднородна, имеет блочный характер и представлена слабозакристаллизованной прослойками высокоосновных ГСК, включающими скопления кристаллов портландита (рис. 7);

– добавка МК способствует формированию плотной однородной структуры предпочтительно из низкоосновных гидросиликатов кальция (рис. 8);

– добавка СЭП приводит к образованию неоднородной структуры с периодически расположенными участками плохо закристаллизованного портландита и гелеобразной С–S–Н-фазы с отношением $\text{CaO/SiO}_2 = 2,5-3$, что связано с замедле-

нием кристаллизации новообразований в ее присутствии (рис. 9);

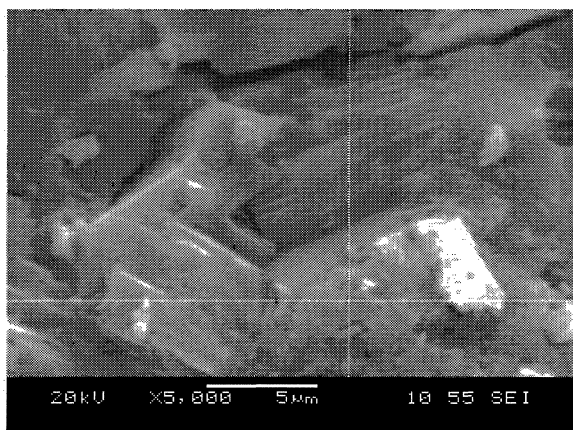
– совместное введение СЭП и МК сопровождается образованием плотной структуры, представленной как слабозакристаллизованной, так и гелеобразной С–S–Н-фазой разной основности, в которой практически не обнаруживается портландит (рис. 10).

Выводы по работе:

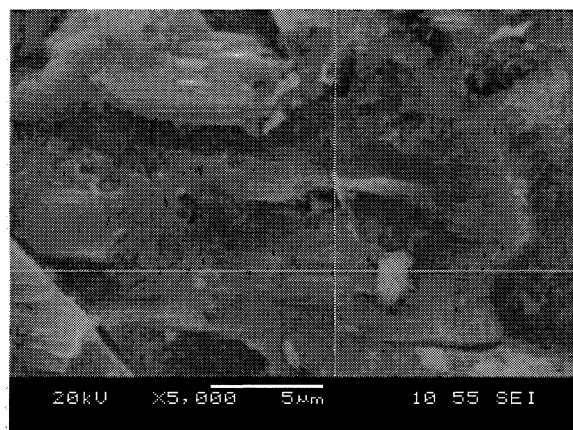
1. Добавка СЭП, адсорбируясь на зернах цемента, способствует их значительной дефлокуляции, однако вызывает замедление гидратационных процессов и скорости кристаллизации новообразований, что сказывается на наборе прочности цементным камнем.

2. МК существенно повышает водопотребность цементных композиций, что вызывает снижение прочности цементного камня по сравнению с бездобавочным и делает применение этой добавки недостаточно эффективным.

3. Введение комплекса добавок «СЭП + МК» в состав цементных композиций ускоряет гидра-

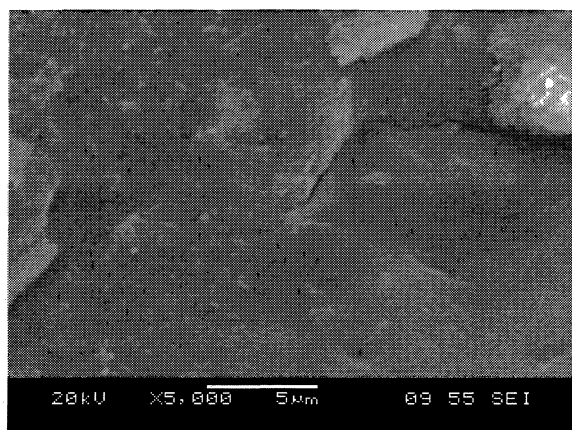


а) увеличение 5000

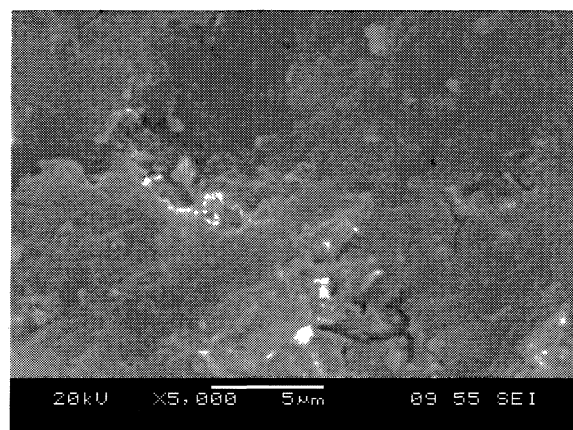


б) увеличение 5000

Рис. 7. Структура цементного камня без добавок

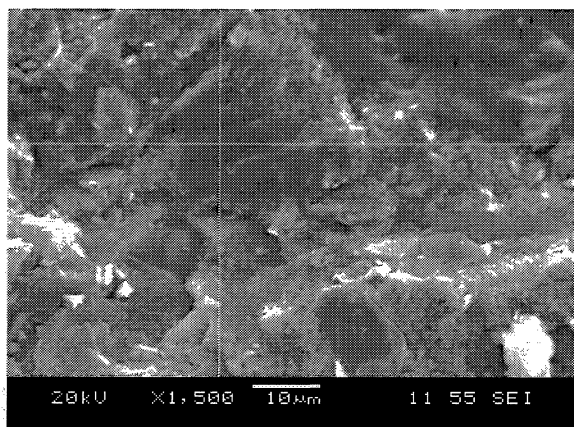


а) увеличение 5000

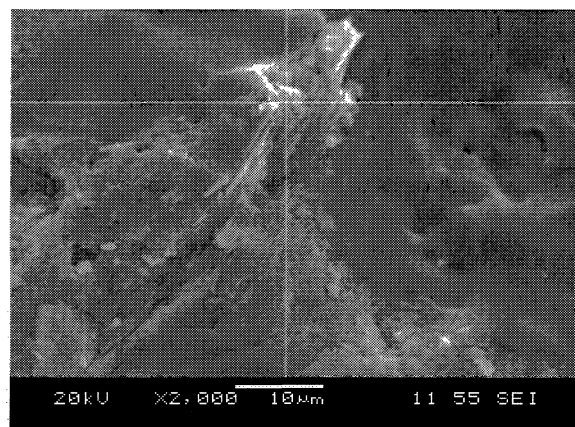


б) увеличение 5000

Рис. 8. Структура цементного камня с 12 % МК

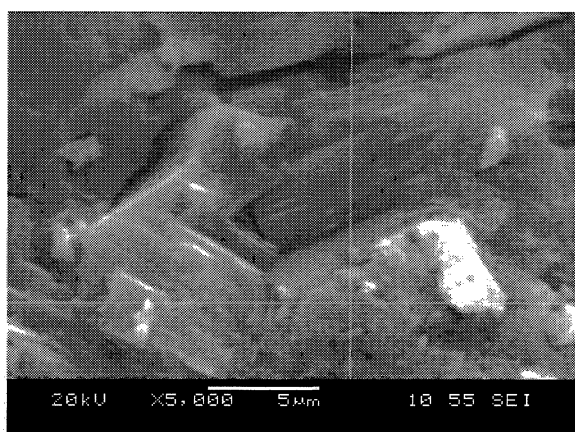


а) увеличение 1500

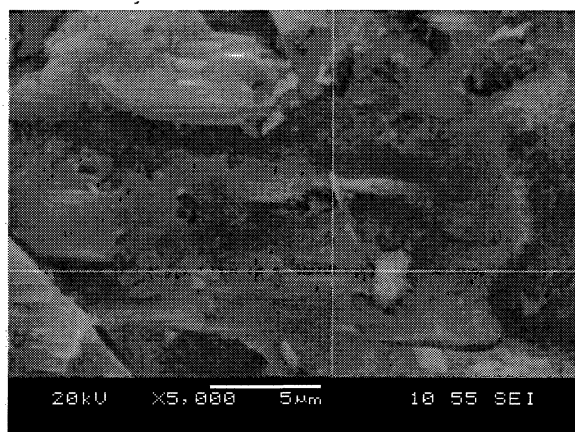


б) увеличение 2000

Рис. 9. Структура цементного камня с 1,2 % СЭП



а) увеличение 5000



б) увеличение 5000

Рис. 10. Структура цементного камня с 1,2 % СЭП и 12 % МК

тацию цемента и способствует формированию смешанной структуры, которая представлена высокоосновными и низкоосновными гидросиликатными новообразованиями разной степени закристаллизованности с пониженным содержанием портландита.

4. Применение МК вместе с СЭП позволяет получить значительный пластифицирующий эффект, что в марочном возрасте приводит к повышению прочности цементного камня на 20 % по сравнению с бездобавочным.

5. Таким образом, используя предлагаемый комплекс добавок, можно существенно влиять на реологию цементных композиций и управлять формированием структуры цементного камня.

Литература

1. Крамар, Л.Я. Влияние добавки микрокремнезема на гидратацию алита и сульфатостойкость цементного камня / Л.Я. Крамар, Б.Я. Тро-

фимов, Л.С. Талисман, Ф.М. Иванов // Цемент. – 1989. – № 6. – С. 14–17.

2. Крамар, Л.Я. Влияние водовяжущего фактора на структуру и прочность цементного камня с добавкой микрокремнезема / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, С.П. Горбунов // Совершенствование технологии вяжущих, бетонов и железобетонных конструкций: межвуз. сб. тр. – Пермь, 1989. – С. 38–42.

3. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки нового поколения / А.В. Ушеров-Маршак // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 45–50.

4. Lothenbach, B. The influence of superplasticizers on the hydration of Portland cement / B. Lothenbach, F. Winnefeld, R. Figi // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. – Montreal, 2007. – P. 211–233.

5. Koizumi, K. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement / K. Koizumi, Y. Umemura, N. Tsuyuki // Proceedings of

*the 12th International Congress on the Chemistry of
Cement. – Montreal, 2007. – P. 64–71.*

*6. Plank, J. Neues zur Wechselwirkung zwischen
Zementen und Polycarboxylat-Fließmitteln / J. Plank,
G. Bassioni, Z. Dai, H. Keller, B. Sachsenhauser,*

*N. Zouaoui // Proceedings der 16 Internationalen
Baustofftagung. – Weimar, 2006. – Band 1. – Seite
579–598.*

Поступила в редакцию 3 марта 2009 г.

Гамалий Елена Александровна, аспирант кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: изучение влияния добавок-пластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства цементных композиций, исследование горелых пород шахтных терриконов как сырья для производства строительных материалов.

E-mail: lenawillis@rambler.ru

Gamaliy Elena Alexandrovna, post-graduate student of the Constructional Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: research of admixtures- plasticizing agents on the base of polycarboxylate upon properties of cement formula, research of burnt rocks of mine waste banks as raw materials for production of constructional materials.

E-mail: lenawillis@rambler.ru

Трофимов Борис Яковлевич, доктор технических наук, профессор, советник РАН, заведующий кафедрой «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: повышение стойкости железобетонных конструкций путем регулирования структуры бетонов за счет модифицирования продуктов гидратации минерального вяжущего для увеличения их дисперсности и стабильности в условиях агрессивного воздействия внешней среды.

E-mail: tbya@mail.ru

Trofimov Boris Yakovlevich, doctor of technical science, professor, councilor of the Russian Academy of Sciences, head of the Constructional Materials department of SUSU.

Scientific interests: enhancement of ferroconcrete structures durability with regulation of the concretes structures by retrofitting the products of hydration of mineral binding with the aim to increase their dispersibility and stability in the conditions of attack of the environment.

E-mail: tbya@mail.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: исследование долговечности строительных материалов, физхимия процессов гидратации и структурообразования вяжущих веществ, материалы на основе магнезиальных вяжущих.

E-mail: kramar-l@mail.ru

Kramar Liudmila Yakovlevna, doctor of technical science, professor of the Constructional Materials department of SUSU.

Scientific interests: research of life duration of constructional materials, physical chemistry of the processes of hydration and structure formation of binding materials, materials on the base of magnesia cements.

E-mail: kramar-l@mail.ru

ЖАРОСТОЙКИЙ ФОСФАТНЫЙ ГАЗОБЕТОН С ДОБАВКАМИ ОТХОДОВ ОГНЕУПОРНОГО ВОЛОКНА

В.А. Абызов, О.А. Клинов

HEAT-RESISTANT PHOSPHATE GAS CONCRETE WITH ADMIXTURES OF WASTE OF FIREPROOF FIBRES

V.A. Abyzov, O.A. Klinov

В работе рассматриваются вопросы совершенствования жаростойких бетонов на фосфатных связках. Показано, что добавка огнеупорного волокна приводит к получению материалов с особыми свойствами.

Ключевые слова: жаростойкие бетоны, фосфатные связующие, ячеистые бетоны, теплоизоляция, огнеупорное волокно, промышленные отходы.

The article considers the issues of improvement of heat-resistant concrete with phosphate bonds. It was proved that admixture of fireproof fiber adds peculiar features to materials.

Keywords: heat-resistant concretes, phosphate bonds, cellular concrete, heat insulation, fireproof fiber, industrial waste.

Одной из наиболее эффективных разновидностей теплоизоляционных материалов, предназначенных для эксплуатации в области температур 1400...1600 °С, является жаростойкий фосфатный газобетон, получаемый методом самораспространяющегося экзотермического синтеза [1, 2]. Данный материал твердеет без термообработки, отличается высокой температурой применения и термической стойкостью (15...25 воздушных теплосмен).

Вопросы повышения качества и снижения себестоимости жаростойкого фосфатного газобетона в последнее время приобрели большую актуальность [1, 3, 5]. Это вызвано рядом причин: ростом цен на ортофосфорную кислоту (ОФК) и фосфатные связующие (ФС), потребностью в бетонах с плотностью менее 500 кг/м³ и бетонах со специальными свойствами. Кроме того, часто возникает необходимость транспортировки изделий из бетона на большие расстояния, в связи с чем необходима повышенная прочность на изгиб.

В связи с этим, значительный интерес представляет введение небольших количеств волокна в жаростойкий тяжелый и особенно – в жаростойкий ячеистый фосфатный газобетон. Для газобетона важны как снижение средней плотности, так и повышение предела прочности при изгибе. В фосфатном цементном камне взаимодействие волокна со связующим приведет к повышению прочности сцепления между ними.

Известен опыт использования асбестового волокна в фосфатных материалах, но полученные материалы имеют невысокие температуры применения. Наиболее ценными свойствами обладают фосфатные бетоны на ФС, содержащие фосфаты хрома и алюминия. При взаимодействии муллитокремнеземистого волокна с ОФК, трехвалентные

катионы Al³⁺, Cr³⁺ будут образовывать фосфорнокислые соединения, отличающиеся высокой огнеупорностью [3–6]. Трехвалентные катионы не искажают кристаллическую решетку фосфатных соединений и повышают прочность цементного камня [5].

Нами была исследована возможность получения ФС на основе ОФК и отходов муллитокремнеземистого волокна. Высокая реакционная способность такого волокна по отношению к ортофосфорной кислоте обусловлена составом волокна, которое состоит из алюмосиликатного стекла. Большой активностью отличается хромсодержащее волокно. С целью удаления с поверхности волокна замасливателя, волокно предварительно подвергали термообработке. Так как обжиг может вызывать кристаллизацию волокна, изучалось влияние температуры термообработки на реакционную способность волокна. Установлено, что наилучшие результаты дает обжиг при 400...600 °С. Повышение температуры обжига до 800 °С вызывает кристаллизацию волокна и резко снижает реакционную способность волокна.

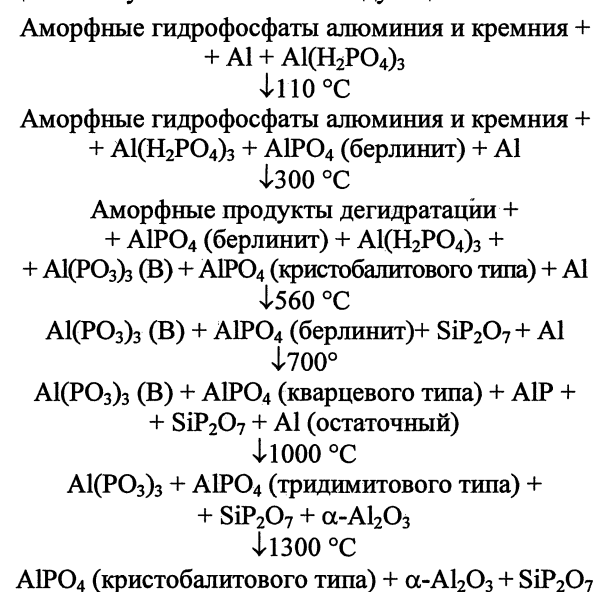
Получено алюмосиликофосфатное связующее (АСФС) со степенью замещения 0,25 и 0,5. Такое АСФС отличается тем, что содержит некоторое количество ультрадисперсных фрагментов муллитокремнеземистого волокна, находящихся во взвешенном состоянии.

Наиболее активно взаимодействует с кислотой муллитокремнеземистое хромсодержащее волокно, в данном случае степень замещения АСФС может быть выше, до 0,3...0,4.

Газобетон на основе АСФС с примесями муллитокремнеземистого волокна отличается повышенной прочностью на изгиб (на 10...15 % против газобетона на основе обычной АФС). Введение в

состав смеси отходов муллитно-кремнеземистого волокна в виде гранул позволяет снизить среднюю плотность до 350...400 кг/м³, предел прочности при сжатии после сушки составляет 0,5 МПа. Газобетон на основе корунда и отходов нефтехимии – отработанного катализатора ИМ 2201 (диалюминия триоксид с примесью диоксида) имеет температуру применения до 1500 °С.

Методами физико-химического анализа (деприватография, рентгено-фазовый анализ) был исследован состав цементного камня в затвердевшем фосфатном газобетоне на АСФС, а также изменение его в процессе нагрева. Установлено, что процессы могут быть описаны следующей схемой:



При ремонтах печей промышленности строительных материалов образуется значительное количество отходов муллитно-кремнеземистого волокна – муллитно-кремнеземистых плит. Использо-

вание заполнителя фракции 5...10 мм из боя муллитно-кремнеземистых плит позволяет получить фосфатный газобетон с пониженной средней плотностью – 400 кг/м³. Традиционный газобетон обычно имеет средние плотности 500 кг/м³ и более.

Литература

1. Абызов, В.А. Жаростойкий газобетон на основе алюмомагнийфосфатного связующего и высокоглиноземистых промышленных отходов / В.А. Абызов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2000. – 21 с.
2. Абызов, В.А. Ячеистые жаростойкие материалы на основе промышленных отходов / В.А. Абызов // Строительство и образование: сб. науч. тр. – Вып. 4. – Екатеринбург, УГТУ, 2001. – С. 123–124.
3. Абызов, В.А. Пути повышения качества жаростойкого фосфатного газобетона / В.А. Абызов, О.А. Клинов // Проблемы повышения надежности и качества строительства: сб. докл. науч.-практ. конф. – Челябинск: Изд-во ЗАО РКФ «Восточные ворота», 2003. – С. 112–113.
4. Абызов, В.А. Жаростойкий газобетон на алюмоборфосфатном связующем / В.А. Абызов, А.Н. Абызов, В.А. Магилат и др. // Строительные материалы и изделия: межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – С. 143–148.
5. Трофимов, Б.Я. Разработка фосфатного связующего для жаростойкого газобетона / Б.Я. Трофимов, В.А. Абызов // Строительство и образование: сб. науч. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 181–185.
6. Абызов, В.А. Ряховский Е.Н. Разработка и опыт применения огнеупорных клеев на фосфатных связующих / В.А. Абызов, Е.Н. Ряховский // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 11. – С. 28–31.

Поступила в редакцию 25 марта 2009 г.

Абызов Виктор Александрович, доцент кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: жаростойкие бетоны, фосфатные материалы, высокотемпературная теплоизоляция, жаростойкие материалы на основе отходов промышленности.

Контактный телефон: 8 (351) 9-044-324.

Abyzov Viktor Alexandrovich, associate professor of the Constructional Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: heat-resistant concretes, phosphate materials, high-temperature heat isolation, heat-resistant materials on the base of industrial waste.

Contact phone: 8 (351) 9-044-324.

Клинов Олег Анатольевич, заместитель директора ОАО «Уральские специальные сплавы» по шлаковой продукции, г. Екатеринбург.

Область научных интересов: волокнистые огнеупорные теплоизоляционные материалы, жаростойкие бетоны, применение ферросплавных шлаков в жаростойких и огнеупорных материалах.

Контактный телефон: 8-912-675-28-95.

Klinov Oleg Anatolievich, open joint-stock company “Ural special alloys”, Yekaterinburg, deputy director for slag production.

Scientific interests: fibrous materials, refractory, heat-insulating materials, heat-resistant concrete, usage of ferroalloy slag in heat-resistant and refractory materials.

Contact phone: 8-912-675-28-95.

Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 697.34

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКВАЖНОСТИ И ПЕРИОДА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

Ю.С. Васильев, В.И. Панферов

ABOUT POROSITY AND PERIOD DEFINITION AT THE PULSE MODE OF BUILDINGS HEATING

Y.S. Vasiliev, V.I. Panferov

Рассматриваются вопросы определения параметров импульсного режима отопления, при котором обеспечивается заданное качество поддержания комфортной температуры в зданиях. Приводятся простые аналитические соотношения для определения скважности и длительности периода управляющих импульсов.

Ключевые слова: температура, режим отопления, микроклимат, скважность, длительность периода.

The questions of parameters definition of pulse mode of heating at which the set quality of comfortable temperature in buildings is provided are considered. Simple analytical parities for definition of porosity and duration of the period of operating impulses are given.

Keywords: temperature, heating mode, microclimate, porosity, duration of the period.

В том случае, когда фактическая мощность системы отопления W при данных значениях параметров теплоносителя и температуры наружного воздуха является избыточной, в здании устанавливается некоторая температура t_{\max} , которая будет заметно превышать свое комфортное значение $t_{\text{комф}}$. В такой ситуации с целью экономии расхода теплоты на отопление и обеспечения приемлемых внутренних климатических условий может применяться импульсный режим отопления зданий, при котором в течение некоторого периода длительностью T система отопления на время γT включается на полную мощность W , а затем полностью отключается до конца периода. При этом возникает вопрос: как следует выбирать длительность периода T и скважность импульсов γ , чтобы температура внутри здания поддерживалась в заданных пределах?

Скважность γ можно определить следующим образом. Понятно, что в стационарном режиме мощность системы отопления W должна равняться теплотерям здания при той температуре, которая установилась внутри него, и при той темпе-

ратуре, которая наблюдается снаружи. Если потери теплоты оценивать по формуле Н.С. Ермолаева [1], то для случая, когда система отопления мощностью W работает в режиме постоянного включения, должно выполняться следующее соотношение:

$$W = qV(t_{\max} - t_n), \quad (1)$$

где q – удельная тепловая характеристика здания, а V – его объем, t_n – температура наружного воздуха. В случае же, когда скважность импульсов подобрана должным образом, получим следующее:

$$\gamma W = qV(t_{\text{комф}} - t_n). \quad (2)$$

Здесь γW – средняя за период T мощность системы отопления в импульсном режиме. Разделив уравнение (2) на уравнение (1), получим, что скважность импульсов следует определять так:

$$\gamma = (t_{\text{комф}} - t_n) / (t_{\max} - t_n). \quad (3)$$

Температуру t_{\max} можно вычислить по математической модели теплового режима здания, которая предварительно должна быть настроена на реальные данные. В частности, это можно сделать и по уравнению (1), которое представляет собой математическую модель стационарного режима.

Для этого достаточно задать или измерить температуру наружного воздуха t_n и мощность системы отопления W с помощью тепломера или тепло-счетчика, установленного на абонентском вводе здания.

Как определить период T не представляется ясным. Можно только сказать, что, скорее всего, период будет пропорционален допустимому малому отклонению Δ от температуры $t_{комф}$ с неизвестным пока коэффициентом пропорциональности. Пусть дана математическая модель периодически-импульсного отопления в виде системы линейных, относительно искомой температуры, уравнений. Например, тепловой режим здания с достаточной точностью описывается линейным дифференциальным уравнением, что обосновано в [2]. Будем предполагать, что систему уравнений можно записать в виде

$$L(t(\tau)) = W(\tau),$$

где L – линейный оператор, $t(\tau)$ – интересующая нас температура как функция времени τ , а в правой части функция $W(\tau)$ – мощность системы отопления. Это позволяет применить для решения поставленной задачи операционное исчисление. Введем следующие безразмерные величины:

$$\theta = (t_b - t_n) / (t_{max} - t_n); \quad \varepsilon = \Delta / (t_{max} - t_n),$$

где t_b – температура внутреннего воздуха. В общем случае θ является функцией времени τ , т. е. $\theta = f(\tau)$.

Рассмотрим три режима отопления, причем относительную температуру внутреннего воздуха в каждом из режимов будем обозначать как $f_i(\tau)$, где i – номер режима отопления.

В первом режиме здание начинает отапливаться из состояния $f_1(0)=0$ невыключающейся системой отопления, тогда $f_1(\infty)=1$. Физические условия задачи дают основания предположить, что функция $f_1(\tau)$ бесконечное число раз дифференцируема на интервале $(0, \infty)$, что $\lim_{\tau \rightarrow 0+} \frac{d}{d\tau} f_1(\tau) \neq 0$

и предел любой ее производной при $\tau \rightarrow +\infty$ равен нулю. Обозначим изображение этой функции $F_1(s)$. Также, учитывая физические условия задачи, будем считать, что $F_1(s)$ имеет особые точки при $s=0$ и в левой полуплоскости s_i , причём $\text{Re}(s_i) < \sigma_1 < 0$. Тогда, на основании теорем о предельных значениях, можно записать, что

$$\lim_{s \rightarrow 0} s F_1(s) = 1, \quad \lim_{s \rightarrow 0} s^k F_1(s) = 0 \quad (k = 2, 3, \dots),$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s^2 F_1(s) \neq 0.$$

Функция $F_1(s)$ в точке $s=0$ имеет простой полюс с вычетом 1.

Второй режим отопления – периодический, начинается с состояния $f_2(0)=0$, причем импульсы длительностью γT включаются в самом начале периода T . Изображение функции $f_2(\tau)$ отличается от изображения $f_1(\tau)$ периодизирующим множителем и имеет вид

$$F_2(s) = \frac{(1 - \exp(-\gamma Ts))}{(1 - \exp(-Ts))} F_1(s).$$

По сравнению с $F_1(s)$, у $F_2(s)$ добавились простые полюсы на мнимой оси в точках $2\pi i l$ ($l = \pm 1, \pm 2, \dots$), здесь i – мнимая единица. Функции $f_2(\tau)$ и $F_2(s)$ можно представить в виде сумм убывающей (стремящейся к нулю) и периодической частей:

$$f_2(\tau) = f_{2убыв}(\tau) + f_{2пер}(\tau), \quad (4)$$

$$F_2(s) = F_{2убыв}(s) + F_{2пер}(s). \quad (5)$$

Принимая в формуле обратного преобразования Лапласа $\tau=0$, получаем, что

$$f_2(0) = 0 = f_{2убыв}(0) + f_{2пер}(0) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} F_2(s) ds + \frac{1}{2\pi i} \int_C F_2(s) ds. \quad (6)$$

Первый интеграл берётся по прямой L_2 , параллельной мнимой оси, с абсциссой σ : $\sigma_1 < \sigma < 0$. Прямая L_2 расположена правее всех особых точек функции $F_1(s)$, кроме особой точки $s=0$, и левее мнимой оси. Первый интеграл определяет начальное значение $f_{2убыв}(0)$. Вторым интеграл берётся по контуру C , состоящему из двух прямых L_2 и L_3 . Прямая L_2 проходит в направлении сверху вниз, а прямая L_3 параллельна мнимой оси с абсциссой σ_3 : $\sigma_3 > 0$; она проходит снизу вверх.

Из равенства (6) следует, что

$$f_{2пер}(0) = \frac{1}{2\pi i} \int_C F_2(s) ds = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} F_2(s) ds = -\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{(1 - \exp(-\gamma Ts))}{(1 - \exp(-Ts))} F_1(s) ds. \quad (7)$$

Заменим множитель $\frac{(1 - \exp(-\gamma Ts))}{(1 - \exp(-Ts))}$ по формуле Тейлора в окрестности точки $s=0$ с остаточным членом третьего порядка:

$$\frac{(1 - \exp(-\gamma Ts))}{(1 - \exp(-Ts))} = \gamma - \frac{\gamma(\gamma-1)Ts}{2} + \frac{\gamma(\gamma-1)(2\gamma-1)T^2s^2}{12} + O(T^3s^3). \quad (8)$$

Здесь $O(T^3s^3)$ – остаточный член порядка T^3s^3 . Такая замена допустима для точек прямой L_2 , нахо-

дящихся от начала координат менее, чем на $2\pi/T$ (расстояние до ближайшей особой точки множителя). Предположим, что эта замена возможна и для остальных точек прямой.

С использованием данной замены формула (7) переписывается в виде

$$f_{2\text{пер}}(0) = -\frac{\gamma}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} F_1(s) ds + \frac{\gamma(\gamma-1)T}{4\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} s F_1(s) ds - \frac{\gamma(\gamma-1)(2\gamma-1)T^2}{24\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} s^2 F_1(s) ds + O(T^3 s^3). \quad (9)$$

Если бы выписанные интегралы вычислялись по прямой, параллельной мнимой оси и расположенной правее всех особых точек $F_1(s)$, включая и точку $s=0$, то они были бы равны начальным значениям функции $f_1(\tau)$ и производных $f_1'(\tau)$ и $f_1''(\tau)$. В данном же случае они будут отличаться от указанных значений на вычеты в точке $s=0$, которые равны соответственно $f_1(\infty)=1$, $f_1'(\infty)=0$, $f_1''(\infty)=0$. Таким образом,

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} F_1(s) ds = f_1(0) - f_1(\infty) = -1, \quad (10)$$

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} s F_1(s) ds = f_1'(0) - f_1'(\infty) = f_1'(0), \quad (11)$$

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} s^2 F_1(s) ds = f_1''(0) - f_1''(\infty) = f_1''(0). \quad (12)$$

С учетом этих равенств формула (9) запишется в виде

$$f_{2\text{пер}}(0) = \gamma + \frac{\gamma(\gamma-1)T}{2} f_1'(0) - \frac{\gamma(\gamma-1)(2\gamma-1)T^2}{12} f_1''(0) + O(T^3). \quad (13)$$

Третий режим отопления заключается в следующем: из состояния $f_3(0)=0$ здание начинает отапливаться также за счет периодического включения системы отопления, только импульсы включения длительностью γT подаются на втором участке периода T , непосредственно примыкая к его концу. Данный режим отопления позволяет оценить максимальную температуру $f_{3\text{пер}}(0)$, достигаемую в импульсном режиме, так как отопление отключается в момент времени, когда температура близка к своему максимальному значению, и этот момент времени является началом следующего периода управления. Найдём выражение для температуры $f_3(\tau)$:

$$F_3(s) = \frac{\exp(-(1-\gamma)Ts) - \exp(-Ts)}{1 - \exp(-Ts)} F_1(s) =$$

$$= \frac{\exp(\gamma Ts) - 1}{\exp(Ts) - 1} F_1(s). \quad (14)$$

Далее, разложим множитель при $F_1(s)$:

$$\frac{\exp(\gamma Ts) - 1}{\exp(Ts) - 1} = \gamma + \frac{\gamma(\gamma-1)Ts}{2} + \frac{\gamma(\gamma-1)(2\gamma-1)T^2 s^2}{12} + O(T^3 s^3). \quad (15)$$

Для температуры $f_{3\text{пер}}(0)$ получаем следующую формулу:

$$f_{3\text{пер}}(0) = \gamma - \frac{\gamma(\gamma-1)T}{2} f_1'(0) - \frac{\gamma(\gamma-1)(2\gamma-1)T^2}{12} f_1''(0) + O(T^3). \quad (16)$$

Предполагая, что

$$f_{2\text{пер}}(0) = \theta_{\text{ср}} - \varepsilon, \quad f_{3\text{пер}}(0) = \theta_{\text{ср}} + \varepsilon,$$

где $\theta_{\text{ср}}$ – среднее значение относительной температуры в установившемся периодическом режиме. Складывая уравнения (13) и (16) и вычитаем их друг из друга, в результате получаем

$$\gamma = \theta_{\text{ср}} + O(\varepsilon^2), \quad (17)$$

$$T = \frac{2\varepsilon}{\gamma(1-\gamma)f_1'(0)} = \frac{2\Delta/(t_{\text{max}} - t_{\text{н}})}{\gamma(1-\gamma)t'_b(0)/(t_{\text{max}} - t_{\text{н}})} = \frac{2\Delta}{\gamma(1-\gamma)t'_b(0)} \quad (18)$$

или

$$\gamma = \theta_{\text{ср}}, \quad T = \frac{2\Delta}{\gamma(1-\gamma) \cdot t'_b(0)}. \quad (19)$$

Таким образом, получены формулы для определения как скважности, так и периода следования импульсов отопления, при которых обеспечивается требуемое качество поддержания температурного режима в здании. Здесь $\Delta/t'_b(0)$ есть время, за которое температура воздуха в здании увеличится на Δ при условии, что скорость нагрева постоянна и равна $t'_b(0)$. Если еще учесть неравенство $\gamma(1-\gamma) \leq 1/4$, то можно утверждать, что период T не меньше, чем время $\Delta/t'_b(0)$, умноженное на 8.

Примеры применения полученных формул

В статье [3] проведён численный расчёт периодически-импульсного режима для модели отопления, описываемой дифференциальным уравнением

$$\frac{d}{d\tau} t_{\text{внут}}(\tau) = \frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{внут}}(\tau) + kW_0}{T_{\text{вр}}},$$

где $t_{\text{внут}}$ – температура внутреннего воздуха, τ – время, $t_{\text{нар}} = 3^\circ\text{C}$ – температура наружного воздуха, коэффициент $k = 0,0169^\circ\text{C}/\text{Вт}$, $W_0 = 2070,6 \text{ Вт}$ – мощность прибора отопления, $T_{\text{вр}} = 83925 \text{ с}$ – постоянная времени. Подсчитаем требуемые скважность и период, чтобы температура колебалась в

пределах $20 \pm 0,15$ °С. Приравняв в уравнении производную к нулю, получим

$$t_{\max} - t_{\text{внут}} = kW_0 = 0,0169 \cdot 2070,6 = 34,99 \text{ °С},$$

средняя относительная температура

$$\theta_{\text{med}} = (20 - 3) / 34,99 = 0,486.$$

Полагая в уравнении $t_{\text{внут}}(0) = t_{\text{нар}} = 3$ °С, находим

$$\frac{d}{d\tau} t_{\text{внут}}(0) = kW_0 / T_{\text{вр}} = 34,99 / 83925 = 0,000417 \text{ °С/с}.$$

По выведенным формулам следует полагать скважность $\gamma = 0,486$, а период T равным

$$2 \cdot 0,15 / (0,486 \cdot (1 - 0,486) \cdot 0,000417) = 2880 \text{ с} = 48 \text{ мин}.$$

В этой статье значение скважности 0,485 было найдено численным экспериментом.

А.Ф. Строй [4] предложил модель отопления, учитывающую нестационарное распределение температуры в стене, теплообмен через стены и окна. Выпишем её вместе с исходными данными для примера:

$$\frac{d}{d\tau} t(x, \tau) = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} t(x, \tau), 0 < x < L, \tau > 0,$$

$$-\lambda \frac{d}{dx} t(0, \tau) = \alpha_{\text{внут}} (t_{\text{внут}}(\tau) - t(0, \tau)),$$

$$-\lambda \frac{d}{dx} t(L, \tau) = \alpha_{\text{нар}} (t(L, \tau) - t_{\text{нар}}),$$

$$c_{\text{внут}} m_{\text{внут}} \frac{d}{d\tau} t_{\text{внут}}(\tau) = w(\tau) - \alpha_{\text{стен}} F_{\text{стен}} (t_{\text{внут}}(\tau) - t(0, \tau)) - k_{\text{окон}} F_{\text{окон}} (t_{\text{внут}}(\tau) - t_{\text{нар}}).$$

Это система линейных уравнений относительно двух искомых функций: $t(x, \tau)$ – температура в точке x по толщине стены здания (в направлении от помещения к наружной среде) в момент времени τ и $t_{\text{внут}}(\tau)$ – температура внутреннего воздуха. $L = 0,568$ м – толщина стены здания, $\lambda = 0,76$ Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности материала стены, $\alpha_{\text{внут}} = 8,7$ Вт/(м²·°С), $\alpha_{\text{нар}} = 23$ Вт/(м²·°С) – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей стены здания, $t_{\text{нар}} = -34$ °С – температура наружной среды, $c_{\text{внут}} = 1005$ Дж/(кг·°С), $m_{\text{внут}} = 198$ кг – удельная теплоёмкость и масса воздуха в здании, $F_{\text{стен}} = 30,9$ м², $F_{\text{окон}} = 20,19$ м² – площади стен и окон, $k_{\text{окон}} = 2,63$ Вт/(м·°С) – коэффициент теплопередачи окон. $w(\tau)$ – мощность отопительного прибора в зависимости от времени, которую будем изменять по импульсно-периодическому закону с мощностью прибора $W_0 = 6000$ Вт. Требуется найти скважность и период, чтобы температура $t_{\text{внут}}(\tau)$ колебалась в пределах 21 ± 1 °С.

Если в уравнениях модели провести линейную замену искомых функций, переводящую тем-

пературу $t_{\text{внут}}(0)$ в нуль, перенести все неизвестные налево, то в первых трех уравнениях справа получатся нули, а в последнем останется мощность прибора $w(\tau)$. Систему можно записать в виде $L(u) = w(\tau)$ с линейным оператором L от совокупности функций $u = \{t(x, \tau), t_{\text{внут}}(\tau)\}$. Так что к данной модели можно применить выведенные формулы.

Для этого нужно найти t_{\max} и $t_{\text{внут}}'(0)$. Считаем, что температура внутри стены установилась по формуле $t(x, \tau) = Ax + B$, $t_{\text{внут}}(\tau) = t_{\max}$, $w(\tau) = W_0$, приравниваем в системе уравнений производные по времени к нулю, решаем получившуюся систему относительно A, B, t_{\max} . Нас интересует только t_{\max} . Получим формулу

$$t_{\max} = t_{\text{нар}} + \left[W_0 (\alpha_{\text{внут}} \alpha_{\text{нар}} L + \lambda (\alpha_{\text{внут}} + \alpha_{\text{нар}})) \right] \times \\ \times \left[(F_{\text{стен}} \alpha_{\text{нар}} \alpha_{\text{внут}} + k_{\text{окон}} F_{\text{окон}} (\alpha_{\text{внут}} + \alpha_{\text{нар}})) \lambda + \right. \\ \left. + \alpha_{\text{внут}} \alpha_{\text{нар}} L k_{\text{окон}} F_{\text{окон}} \right]^{-1},$$

из которой, после подстановки исходных данных, вычислим: $t_{\max} = 35,26$ °С. Значение $t_{\text{внут}}'(0)$ найдём, положив в последнем уравнении системы $\tau = 0$, $w(\tau) = W_0$. Скобки в правой части уравнения зануляются. Получим

$$t_{\text{внут}}'(0) = W_0 / (c_{\text{внут}} m_{\text{внут}}) = 0,03015 \text{ °С/с}.$$

Средняя относительная температура

$$\theta_{\text{med}} = (21 - (-34)) / (35,26 - (-34)) = 0,7941.$$

По выведенным формулам скважность $\gamma = 0,7941$, период $T = 405,7$ с. По этой модели были проведены расчёты с использованием разностной схемы. При достижении верхней допустимой температуры отопительный прибор выключался, при достижении нижней – включался. Через большое количество таких циклов скважность и период установились на значениях $\gamma = 0,7949$, $T = 403,5$ с. Если при этих же исходных данных нужно найти скважность и период, чтобы температура была в пределах 17 ± 1 °С, то по формулам получается $\gamma = 0,7363$, $T = 341,66$ с, а с помощью разностной схемы $\gamma = 0,7376$, $T = 341,34$ с. Разница в значениях вполне удовлетворительная.

Литература

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Панферов, В.И. Моделирование и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции»: сб. – М.: МГСУ, 2005. – С. 94–98.

Инженерное оборудование зданий и сооружений

3. Дегтярь, А.Б. Разработка и исследование импульсного режима отопления зданий / А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов // *Материалы Второй Международной науч.-техн. конф. «Теоретические ос-*

новы теплогазоснабжения и вентиляции»: сб. – М.: МГСУ, 2007. – С. 106–111.

4. Строй, А.Ф. *Управление тепловым режимом зданий и сооружений*. – Киев: Вища школа, 1993. – 153 с.

Поступила в редакцию 18 марта 2009 г.

Васильев Юрий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» ЮУрГУ.

Область научных интересов: численные методы решения задач математической физики.

Контактный телефон: 2-67-90-43.

Vasiliev Yury Sergeevich, candidate of physical and mathematical science, associate professor of the Applied Mathematics department of South Ural State University.

Scientific interests: numerical procedures of solving the mathematical physics problems.

Contact phone: 2-67-90-43.

Панферов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплотехнических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

Контактный телефон: 2-67-96-88.

Panferov Vladimir Ivanovich, Doctor of technical science, professor, head of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of SUSU.

Scientific interests: simulation and optimization of heat engineering processes and systems, automation of technological objects.

Contact phone: 2-67-96-88.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Ю.С. Васильев, А.Б. Донская

ENGINEERING FORMULAE FOR TIME CONSTANT DEFINITION

Y.S. Vasiliev, A.B. Donskaya

Для простейших одномерных задач теплопроводности выведены формулы, с помощью которых можно приближённо, не решая трансцендентное уравнение, определить постоянную времени теплового процесса. Полученные формулы удобны для предварительных расчетов с применением любого калькулятора.

Ключевые слова: постоянная времени, алгоритм Ремеза.

For simple one-dimensional problems of heat-transfer capacity the formulae enabling the approximate definition of the time constant of the thermal process without solving a transcendental equation were derived. The deduced formulae are good for preliminary calculation with usage of any calculator.

Keywords: time constant, Remez algorithm.

Введение

При теплотехнических расчетах часто необходимо знать, через какое время после начала процесса распределение температуры можно считать регулярным, а также с какого момента процесс можно считать установившимся. Характеристикой процесса, с помощью которой можно определить это время, является постоянная времени.

Постоянной времени считается число T в представлении решения уравнения теплопроводности в виде ряда, получающегося при решении задачи методом Фурье:

$$t(x, \tau) = \psi(x) + A_1 e^{-\frac{\tau}{T}} \varphi_1(x) + A_2 e^{-\frac{\tau}{T_2}} \varphi_2(x) + \dots, \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ – температура в точке с пространственной координатой x в момент времени τ ; $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots$ – собственные функции соответствующей задачи Штурма–Лиувилля; $\psi(x)$ – распределение температуры, которое установится в пределе при $\tau \rightarrow \infty$. Для нахождения постоянной времени T следует найти наименьший положительный корень μ характеристического уравнения, после чего постоянную времени можно найти по формуле

$$T = \frac{l^2}{a} \cdot \frac{1}{\mu^2}, \quad (2)$$

где l – толщина пластины, a – коэффициент температуропроводности.

Зная постоянную времени, можно сказать с какого времени процесс можно считать регулярным, то есть удовлетворительно описанным толь-

ко первыми двумя членами в разложении (1). Действительно, через время T второй член в выражении (1) уменьшится в $e \approx 2,7$ раза. В рассматриваемых здесь простых задачах второй корень характеристического уравнения по крайней мере в два раза больше первого корня μ ; показатели в экспонентах обратно пропорциональны квадратам характеристических чисел. Это означает, что третий член через время T уменьшится по крайней мере в $e^4 \approx 55$ раз. Поэтому на практике можно считать, что через время T процесс становится регулярным. Через время $3T$ первая экспонента в выражении (1) уменьшится в $e^3 \approx 20$ раз, следующие члены ничтожно малы, и процесс можно считать установившимся.

Характеристическое уравнение может быть трансцендентным и довольно сложным. Хотя при нынешнем развитии вычислительной техники, решить это уравнение нетрудно, неплохо иметь для этого простые приближенные формулы. В данной статье выводятся такие формулы для простейших задач теплопроводности.

Постановка задачи

Для неограниченной пластины (теплоизолированной с боков стержня, стены) распространение тепла описывается уравнением

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l, \quad (3)$$

начальным условием

$$t(x, 0) = \varphi(x) \quad (3.1)$$

и одним из краевых условий на поверхности пластины, например, при $x = l$:

$$t(l, \tau) = t_B - \text{первого рода,} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = q - \text{второго рода,} \quad (3.3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = \alpha \cdot (t_B - t(l, \tau)) - \text{третьего рода.} \quad (3.4)$$

Аналогичные условия ставятся и при $x = 0$. Здесь l – толщина пластины (стены), α – коэффициент теплоотдачи, λ – коэффициент теплопроводности материала пластины (стены), t_B – температура внешней среды, q – тепловой поток. Для характеристики условий третьего рода применяют безразмерный критерий Био: $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$.

Краевые условия I и III рода

Предположим, что в задаче (3) заданы краевые условия первого и третьего рода. В этом случае характеристическое уравнение [1, 2] запишем в виде

$$\mu \operatorname{ctg}(\mu) = -Bi. \quad (4)$$

Будем считать наименьший положительный корень этого уравнения функцией критерия Био: $\mu = \mu(Bi)$, $0 \leq Bi \leq \infty$, причём, $\mu(0)$ и $\mu(\infty)$ полагаем равными предельным значениям. Поскольку в формуле (2) для постоянной времени участвует множителем выражение $1/\mu^2$, то введём функцию $\mu_2(Bi) = \frac{1}{\mu^2(Bi)}$. Функция $\mu_2(Bi)$ убывает

от $\frac{4}{\pi^2}$ до $\frac{1}{\pi^2}$. Её график (рис. 1) похож на график дробно-рациональной функции, поэтому будем искать приближение для $\mu_2(Bi)$ в виде

$$M(Bi) = \frac{ABi + B}{Bi + C}, \quad (5)$$

где три параметра A, B, C нужно найти.

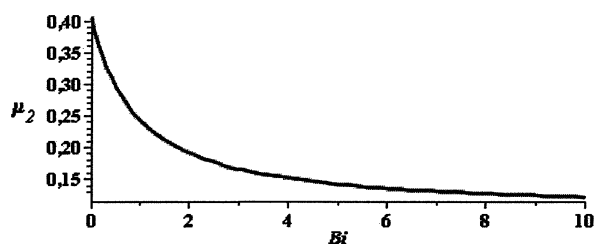


Рис. 1. График функции μ_2

Естественно потребовать совпадения функций $\mu_2(Bi)$ и $M(Bi)$ при $Bi = 0$ и $Bi = \infty$, что даёт равенства $\frac{B}{C} = \frac{4}{\pi^2}$, $A = \frac{1}{\pi^2}$. Тогда приближение приобретает вид

$$M(Bi) = \frac{Bi + 4C}{\pi^2(Bi + C)}. \quad (6)$$

Для определения параметра C приравняем производные функций $\mu_2(Bi)$ и $M(Bi)$ при $Bi = 0$:

$$\frac{32}{\pi^4} = -\frac{3}{\pi^2 C}, \text{ откуда } C = \frac{3\pi^2}{32}. \text{ Теперь функция}$$

$M(Bi)$ полностью определяется:

$$M(Bi) = \frac{Bi + 3\pi^2/8}{\pi^2(Bi + 3\pi^2/32)}. \quad (7)$$

График относительной погрешности

$$\delta(Bi) = \frac{\mu_2(Bi) - M(Bi)}{\mu_2(Bi)}$$

приведён на рис. 2.

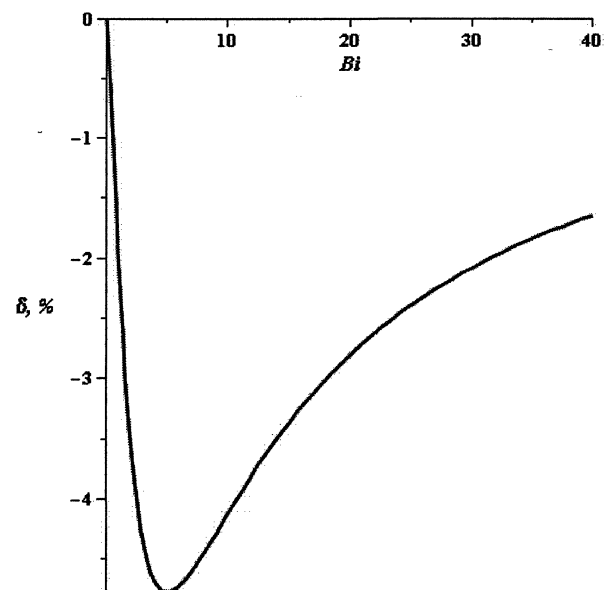


Рис. 2. Относительная погрешность формулы (7)

Из графика видно, что приближение одностороннее, т. е. $M(Bi) > \mu_2(Bi)$ и, используя формулу (7) для определения постоянной времени, получаем приближённое значение с избытком, но не более 5%. При выводе этой формулы мы использовали простые и вполне очевидные условия. Для применения запишем формулу (7) в виде

$$M(Bi) = \frac{0,1013Bi + 0,3750}{Bi + 0,9255}. \quad (8)$$

Может оказаться, что 5% – большая погрешность. Выведем формулу с меньшей погрешностью. Для этого поставим задачу: подобрать значения параметров A, B, C в формуле (5) так, чтобы достигался минимум максимальной относительной погрешности при всех значениях Bi , то есть найти

$$\arg \left\{ \min \left(\max \left(\frac{|\mu_2(Bi) - M(Bi)|}{\mu_2(Bi)}, Bi = 0.. \infty \right) \right), \{A, B, C\} \right\}. \quad (9)$$

Для решения этой задачи есть алгоритм Ремеза [3], применив который, получаем формулу

$$M(Bi) = \frac{0,1Bi + 0,3365}{Bi + 0,8193}, \quad (10)$$

относительная погрешность которой составляет 1,4 %. Это видно из графика на рис. 3.

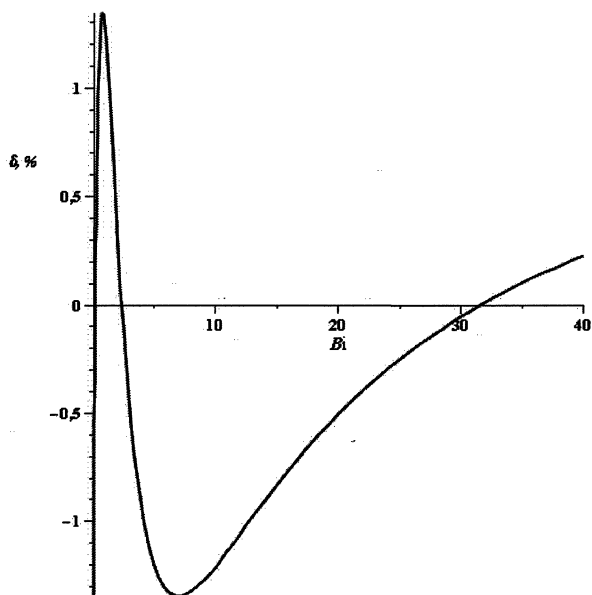


Рис. 3. Относительная погрешность формулы (11)

По сравнению с формулой (8) погрешность при стремлении Bi к нулю или бесконечности увеличивается.

Краевые условия II и III рода

Пусть в задаче (3) заданы краевые условия второго и третьего рода. Тогда характеристическое уравнение будет иметь вид [1, 2]

$$\operatorname{ctg}(\mu) = \frac{\mu}{Bi}. \quad (11)$$

Аналогично предыдущему случаю, будем считать наименьший положительный корень этого уравнения функцией критерия Био: $\mu = \mu(Bi)$, $0 \leq Bi < \infty$. При построении графиков левой и правой частей этого уравнения в зависимости от μ ,

становится очевидно, что $\mu \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, $\mu(0) = 0$,

$\mu(\infty) = \frac{\pi}{2}$, функция $\mu(Bi)$ возрастает. Так как в формуле (2) постоянная времени зависит от μ^2 , то введём функцию $\mu_2(Bi) = \mu^2(Bi)$. Функция $\mu_2(Bi)$ возрастает от 0 до $\frac{\pi^2}{4}$. Будем искать приближение для μ_2 в виде (5), где три параметра A, B, C неизвестны.

Потребуем совпадения функций $\mu_2(Bi)$ и $M(Bi)$ при $Bi = 0$ и $Bi = \infty$, что даст равенства

$\frac{B}{C} = 0, A = \frac{\pi^2}{4}$. Тогда получим приближение в виде

$$M(Bi) = \frac{Bi \cdot \pi^2/4}{Bi + C}. \quad (12)$$

Неизвестный параметр C найдем из условия равенства производных функций $\mu_2(Bi)$ и $M(Bi)$ при $Bi = 0$: $1 = \frac{\pi^2}{4C}$, откуда $C = \frac{\pi^2}{4}$. Таким образом, получим функцию $M(Bi)$:

$$M(Bi) = \frac{Bi \cdot \pi^2/4}{Bi + \pi^2/4}. \quad (13)$$

Так как в формуле (2) для постоянной времени участвует выражение $\frac{1}{\mu^2}$, то введем функцию

$$\mu_3(Bi) = \frac{1}{\mu^2}. \text{ Приближением для функции } \mu_3(Bi)$$

будет функция $M_2(Bi) = \frac{1}{M(Bi)}$, т. е.

$$M_2(Bi) = \frac{Bi + \pi^2/4}{Bi \cdot \pi^2/4}. \quad (14)$$

Из графика относительной погрешности

$$\delta(Bi) = \frac{\mu_3(Bi) - M_2(Bi)}{\mu_3(Bi)}$$

можно увидеть, что $M_2(Bi) > \mu_3(Bi)$, то есть, используя формулу (14) для определения постоянной времени, получаем одностороннее приближённое значение с избытком, но не более 5,1%. Так же, как и в предыдущем случае, достоинство этой формулы – ее простота. Для применения запишем формулу в виде

$$M_2(Bi) = \frac{0,4052Bi + 1}{Bi}. \quad (15)$$

Возможны ситуации, в которых 5 % будет слишком большой погрешностью и необходима более высокая точность вычислений. Для таких случаев выведем формулу с меньшей погрешностью. Аналогично предыдущей задаче воспользуемся алгоритмом Ремеза. Получим формулу

$$M_2 = \frac{(0,4024Bi + 0,8109)(1 + Bi)}{(Bi + 0,8051)Bi}.$$

Для вычисления значения M_2 по полученной формуле необходимо выполнить семь арифметических действий. Для того, чтобы добиться более удобного вида, запишем ее в виде суммы простейших дробей:

$$M_2(Bi) = 0,4024 + \frac{1,007}{Bi} - \frac{0,1179}{Bi + 0,8051}. \quad (16)$$

Относительная погрешность полученной формулы составляет 0,8 %, что видно из графика на рис. 4.

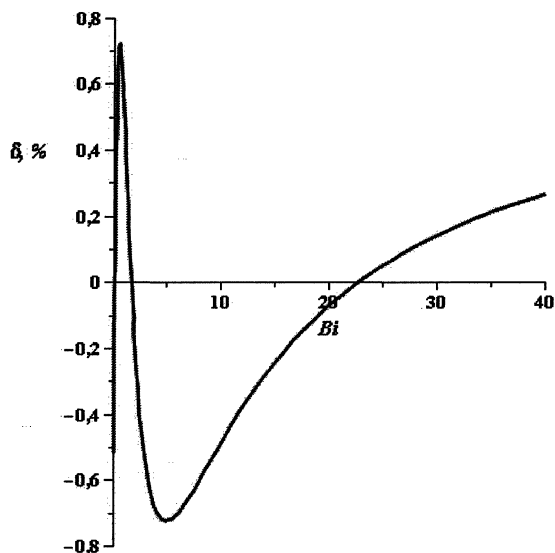


Рис. 4. Относительная погрешность формулы (16)

Условия III рода на обеих границах

В этом случае характеристическое уравнение

$$\operatorname{ctg}(\mu) = \frac{\mu^2 - Bi_1 Bi_2}{\mu(Bi_1 + Bi_2)}, \quad (17)$$

где Bi_1 и Bi_2 – критерии Био для поверхностей пластины. Обозначим $s = Bi_1 + Bi_2$, $p = Bi_1 Bi_2$. Считаем, что наименьший положительный корень этого уравнения есть функция параметров s, p : $\mu = \mu(s, p)$. В этих обозначениях для определения характеристического значения μ следует решать уравнение

$$\operatorname{ctg}(\mu) = \frac{\mu^2 - p}{\mu s}. \quad (18)$$

Область определения функции $\mu(s, p)$:

$0 \leq s < \infty$, $0 \leq p \leq s^2/4$. Свойства: $\mu(0, 0) = 0$,

$\lim_{s \rightarrow \infty} \mu(s, p) = \frac{\pi}{2}$; при $p = \frac{\pi^2}{4}$ имеем равенство

$\mu\left(s, \frac{\pi^2}{4}\right) = \frac{\pi}{2}$; функция $\mu(s, p)$ возрастает как

функция от p ; на граничной линии $p = s^2/4$ имеем

$\lim_{s \rightarrow \infty} \mu\left(s, \frac{s^2}{4}\right) = \pi$; все линии уровня функции

$\mu(s, p)$ являются прямыми. Как и раньше, для мно-

жителя $\frac{1}{\mu^2}$ в формуле (2) будем искать приближен-

ную формулу для функции $\mu_2(s, p) = \frac{1}{\mu^2(s, p)}$ в

виде дробно-рациональной функции от параметров s, p :

$$M(s, p) = \frac{1 + As + Bp}{C + Ds + Ep}. \quad (19)$$

Коэффициенты в этом выражении определим из следующих соображений. Если $p = 0$, то один из критериев Bi_1 или Bi_2 равен нулю, а параметр s совпадает со вторым из них. Имеем уже рассмотренный случай условий второго и третьего рода, и правая часть в (19) должна выглядеть как

$$\frac{1 + 4s/\pi^2}{s} \quad (\text{с погрешностью } 5\%). \quad \text{Отсюда } A = \frac{4}{\pi^2},$$

$C = 0$, $D = 1$. Формула (19) приобретает вид

$$M(s, p) = \frac{1 + 4s/\pi^2 + Bp}{s + Ep}.$$

Из свойств функции $\mu(s, p)$ следует, что

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \mu_2\left(s, \frac{s^2}{4}\right) = \frac{1}{\pi^2} \quad \text{и} \quad \mu_2\left(s, \frac{\pi^2}{4}\right) = \frac{4}{\pi^2},$$

что в применении к дроби $M(s, p)$ даёт равенства

$$B/E = 1/\pi^2 \quad \text{и} \quad 1 + E/4 = E. \quad \text{Из них } E = \frac{4}{3}, \quad B = \frac{4}{3\pi^2},$$

и окончательно

$$M(s, p) = \frac{1 + 4s/\pi^2 + 4p/3\pi^2}{s + 4p/3}. \quad (20)$$

Рассмотрение графика погрешности показывает, что погрешность последней формулы не более 5%. Для применения запишем формулу в виде

$$M(s, p) = \frac{1 + 0,4052s + 0,1350p}{s + 1,333p}, \quad (21)$$

или

$$M(Bi_1, Bi_2) = \frac{1 + 0,4052(Bi_1 + Bi_2) + 0,1350Bi_1Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + 1,333Bi_1Bi_2}.$$

Более точную формулу, без заметного усложнения, авторам получить не удалось.

Сводка результатов

Сведем все возможные случаи сочетаний крайних условий и полученные формулы в таблицу.

Пример

Рассмотрим ограждающие конструкции помещений главного корпуса ЮУрГУ. Стены здания кирпичные толщиной $l = 0,51$ м, характеристики кирпича: плотность $\rho = 1800$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 880$ Дж/(кг·°C), коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,7$ Вт/(м·°C). Обычно расчет ведется для холодного периода, для которого коэффициенты теплоотдачи $\alpha_H = 23$ Вт/(м²·°C), $\alpha_B = 8,7$ Вт/(м²·°C). Данные взяты из [4, 5]. Найдем постоянную времени.

Имеем задачу теплопроводности с крайними условиями третьего рода с обеих сторон. Проведем необходимые вычисления. Найдем коэффициент температуропроводности a по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = 4,419 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Запишем коэффициенты теплоотдачи в терминах статьи: $\alpha_1 = 23$ Вт/(м²·°C), $\alpha_2 = 8,7$ Вт/(м²·°C).

Формулы постоянной времени для неограниченной пластины

$$\left(\begin{array}{l} \text{уравнение } \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, 0 < x < l; Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \end{array} \right)$$

	Краевые условия	Характеристическое уравнение	Формулы для постоянной времени T		
			Точные	Приближенные (погрешность 5 %)	Уточненные (погрешность)
I и I рода	$t(0, \tau) = t_H, t(l, \tau) = t_B$	$\sin(\mu) = 0$	$\frac{l^2}{a \cdot \pi^2}$		
I и II рода	$t(0, \tau) = t_H, \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = 0$	$\cos(\mu) = 0$	$\frac{4 \cdot l^2}{a \cdot \pi^2}$		
II и II рода	$\frac{\partial t}{\partial x}(0, \tau) = 0, \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = 0$	$\sin(\mu) = 0$	$\frac{l^2}{a \cdot \pi^2}$		
I и III рода	$t(0, \tau) = t_H,$ $\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = \alpha \cdot (t_B - t(l, \tau))$	$\mu \cdot \text{ctg}(\mu) = -Bi$	$\frac{l^2}{a} \cdot \frac{0,1013Bi + 0,3750}{Bi + 0,9255}$	$\frac{l^2}{a} \cdot \frac{0,1Bi + 0,3365}{Bi + 0,8193}$ (1,4%)	
II и III рода	$\frac{\partial t}{\partial x}(0, \tau) = 0,$ $\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = \alpha \cdot (t_B - t(l, \tau))$	$\text{ctg}(\mu) = \mu \cdot \frac{1}{Bi}$	$\frac{l^2}{a} \cdot \frac{0,4052Bi + 1}{Bi}$	$\frac{l^2}{a} \cdot \left(0,4024 + \frac{1,007}{Bi} - \frac{0,1179}{Bi + 0,8051} \right)$ (0,8%)	
III и III рода	$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}(0, \tau) = -\alpha_1 \cdot (t_H - t(0, \tau)),$ $\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}(l, \tau) = \alpha_2 \cdot (t_B - t(l, \tau))$	$\text{ctg}(\mu) = \frac{\mu^2 - Bi_1 Bi_2}{\mu (Bi_1 + Bi_2)}$	$\frac{l^2}{a} \cdot \frac{1 + 0,4052(Bi_1 + Bi_2) + 0,1350Bi_1 Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + 1,333Bi_1 Bi_2}$		

Инженерное оборудование зданий и сооружений

Вычислим критерии Био:

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 l}{\lambda} = 16,757, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 l}{\lambda} = 6,339.$$

Найдем значение постоянной времени по соответствующей формуле из таблицы:

$$T = \frac{l^2}{a} \cdot \frac{1 + 0,4052(Bi_1 + Bi_2) + 0,1350Bi_1Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + 1,333Bi_1Bi_2} =$$
$$= 88268 \text{ с} = 24,5 \text{ ч.}$$

Затем вычислим точное значение. Для этого решим характеристическое уравнение (18), а затем подставим полученное значение в формулу (2). В результате получим точное значение постоянной времени $T = 87156 \text{ с} = 24,21 \text{ ч}$. Относительная погрешность приближенного значения $\delta = 1,2\%$.

Заключение

Выведенные формулы просты и удобны в применении. Они имеют небольшую погрешность, допустимую в предварительных расчетах. Их можно использовать для получения начальных

приближений в численных методах. Похожим образом можно получить подобные формулы для других случаев (цилиндра, шара).

Литература

1. Лыков, А.В. *Теория теплопроводности* / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Лыков, А.В. *Тепломассобмен: справ.* / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
3. Ремез, Е.Я. *Основы численных методов чебышевского приближения* / Е.Я. Ремез. – Киев: Наукова думка, 1969. – 624 с.
4. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». – М.: Госстрой России, 2004. – 25 с.
5. СП 23-101-2004 «Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий». – М.: Техкнига-Сервис, 2004. – 139 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2009 г.

Васильев Юрий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Южно-Уральского государственного университета.

Область научных интересов: применение численных методов решения задач моделирования и оптимизации.

Контактный телефон: 2-67-90-43.

Vasiliev Yury Sergeevich, candidate of physical and mathematical science, associate professor of the Applied Mathematics department of South Ural State University.

Scientific interests: application of numerical procedures to solving of problems of simulation and optimization.

Contact phone: 2-67-90-43.

Донская Алена Борисовна, студентка 5 курса кафедры «Прикладная математика» Южно-Уральского государственного университета.

Область научных интересов: численные методы, теория приближения функций.

Контактный телефон: 8-908-581-72-92.

Donskaya Alena Borisovna, 5-year student of the Applied Mathematics department of South Ural State University.

Scientific interests: numerical procedures, function approximation theory.

Contact phone: 8-908-581-72-92.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВЫБОРА И НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

С.В. Панферов, А.И. Телегин

ANALYSIS OF CHOICE QUALITY AND ADJUSTMENT OF THE AUTOMATIC FLUID LEVEL CONTROLLER

S.V. Panferov, A.I. Telegin

Рассматривается задача структурно-параметрического синтеза системы автоматического регулирования уровня жидкости. Приводится структура и параметры настройки квазиоптимального регулятора. Анализируются устойчивость системы и качество переходных процессов в ней.

Ключевые слова: автоматический регулятор, уровень жидкости, структура, параметры настройки, устойчивость, качество переходных процессов.

The problem of structurally-parametrical synthesis of system of automatic control of level of a liquid is considered. The structure and adjustment parameters a regulator is resulted. Stability of system and quality of transients in it are analyzed.

Keywords: automatic regulator, liquid level, structure, adjustment parameters, stability, quality of transients.

В настоящее время в системах теплоснабжения для автоматического регулирования различных переменных технологических процессов широко используются ПИД-регуляторы и их частные варианты. Накоплен огромный опыт применения таких регуляторов, в частности, разработаны и апробированы различные способы их настройки. Вместе с тем, как неоднократно отмечает В.Я. Ротач в своем сравнительно недавно изданном учебнике [1], П-, ПИ- и ПИД- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82 и др.] и что «...достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения... до сих пор получить не удалось» [1, с. 24].

В работах [2, 3], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов, здесь задача решалась методом «подгонки» передаточной функции замкнутой системы к некоторому достаточно разумному и практически достижимому виду. Найдены эталонные структуры и настройки регуляторов для типовых динамических характеристик промышленных объектов управления, при этом установлено, что все эти регуляторы принадлежат ПИД-семейству. Казалось бы, что поставленная цель достигнута, однако для полноты исследования проблемы необходимо рассмотреть вопрос о качестве переходных процессов в таких системах и о грубости этих структур и настроек, данная задача и решается в настоящей работе.

Рассмотрим объект управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{1}{T_{об}p} \exp(-\tau_{об}p), \quad (1)$$

где $T_{об}, \tau_{об}$ – соответственно постоянная времени и время запаздывания объекта, p – комплексная переменная. Такими передаточными функциями описываются различные объекты регулирования уровня жидкостей в системах теплоснабжения: конденсаторы, деаэраторы, расширительные баки, выполняющие роль гидростатических стабилизаторов давления в заданных точках тепловой сети, и др.

Как известно [2, 3], близким к идеальному для такого объекта является П-регулятор с коэффициентом передачи $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$, где θ – достаточно

малая постоянная времени. Для анализа переходных процессов в системе с объектом управления данного типа разработаны две компьютерные программы: одна для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая – при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод $T_{об}, \tau_{об}$ и коэффициента передачи П-регулятора, каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование σ и время регулирования t_p , а также вычисляет значения следующих критериев:

$$I_1 = \int_0^{t_k} |\varepsilon(t)| dt, \quad (2)$$

$$I_2 = \int_0^{t_K} \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$ – ошибка регулирования (рас- согласование), $x^3(t)$ и $x(t)$ – соответственно за- данное и действительное значение регулируемой величины, t – время, t_K – конечное время оценки переходного процесса. Здесь время регулирования t_p определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %.

В процессе численных вычислений установ- лено, что во всех случаях, когда $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ (пара- метр θ полагается равным нулю), дифференци- альное уравнение замкнутой системы автоматиче- ского регулирования (САР) будет иметь вид:

$$\tau_{об} \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об}) = x^3(t - \tau_{об}). \quad (4)$$

Решая уравнение (4) для единичного ступен- чатого воздействия, нашли, что во всех этих слу- чаях $\sigma \cong 49\%$. Если численное значение k_p отли- чается от величины $\frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ ($\theta \neq 0$), то изменяется и

величина перерегулирования. Полученные значе- ния показателей качества переходного процесса, например, для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, а k_p принимает различные значения в окрестности точки $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$ приведены в табл. 1.

Провели исследование качества переходных процессов и для других значений параметров объ- екта регулирования, в частности, для $T_{об} = 30$ с, $\tau_{об} = 10$ с и для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 3$ с.

Анализируя полученные данные, можно отме- тить следующее: при эталонном (базовом) значении коэффициента передачи П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ перерегулирование σ в рассматриваемых САР

при различных значениях $T_{об}, \tau_{об}$ получается практически одинаковым и равным $\approx 47 \div 49\%$. Время регулирования при прочих равных условиях растет прямо пропорционально росту $(T_{об} + \tau_{об})$ и

обратно пропорционально величине $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$. Ба-

зовая настройка П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ является достаточно грубой (робастной), поскольку суще- ствует заметная окрестность точки $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$, в

которой сохраняются приемлемое качество и запас устойчивости системы (заметим, что о запасе ус- тойчивости можно судить непосредственно по семейству кривых переходного процесса, полу- ченных при различных настройках регулятора). Настройки П-регулятора, оптимальные по крите- риям (2) и (3) не совпадают как между собой, так и каждая с базовой настройкой. Так, например, в случае табл. 1 базовое значение коэффициента передачи равно $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, вместе с тем

оптимальное по минимуму критерия I_1 значение равно $k_p = 1,75 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, а оптимальное по минимуму

критерия I_2 значение равно $k_p = 2,5 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$.

Причем настройки, найденные из условия мини- мума критерия I_2 заметно ближе к базовой на- стройке, в некоторых случаях их различие можно считать достаточно малым. Очевидно, что все это объясняется как существом рассматриваемого ме- тода синтеза САР, так и определенной погрешно- стью выкладок при его реализации.

Показатели качества переходных процессов в САР при возмущении по нагрузке (со стороны регулирующего органа), например, для случая табл. 1 приведены в табл. 2.

В целом, анализ полученных результатов по- казал, что величина перерегулирования σ при

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\sigma, \%$	0	0	3,43	9,30	16,3	31,79	49	64,4	80,7
$t_p, \text{с}$	79	32,4	17	25,4	24,8	33,2	42,2	69,8	99,8
$I_1, (\text{ед. рег. вел.}) \cdot \text{с}$	29,47	14,99	10,71	10,32	10,40	11,47	13,79	18,16	26,99
$I_2, (\text{ед. рег. вел.})^2 \cdot \text{с}$	88,34	52,30	41,67	39,27	37,97	37,88	41,09	49,38	70,36

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по нагрузке

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\sigma, \%$	0	0	3,43	9,30	16,3	31,79	47,9	64,4	80,7
$t_p, \text{с}$	17,6	13,6	12,4	12,0	11,8	11,4	11,2	11,0	19,8
$I_1, (\text{ед. рег. вел.}) \cdot \text{с}$	0,391	0,199	0,143	0,137	0,138	0,153	0,184	0,241	0,354
$I_2 \cdot 10^2, (\text{ед. рег. вел.})^2 \cdot \text{с}$	1,570	0,929	0,741	0,698	0,675	0,673	0,731	0,877	1,248

одинаковых настройках регулятора остается практически одной и той же как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, несмотря на то, что σ в этих случаях вычисляется вообще-то по-разному [4, 5]. Кроме того, координаты точек минимума функций $I_1 = f_1(k_p)$ и $I_2 = f_2(k_p)$, вычисленных для случая возмущения по нагрузке, также удивительным образом совпадают с аналогичными координатами в случае возмущения по заданию. По-видимому, данные обстоятельства подтверждают известное высказывание о том, что если САР оптимизирована для отработки возмущений по заданию, то одновременно достигается оптимум и при отработке возмущений по нагрузке [6].

Время регулирования t_p при прочих равных условиях при возмущении со стороны регулирующего органа меньше, чем в случае возмущения по заданию, что, в общем-то, достаточно объяснимо.

Если робастность рассматривать как грубость системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, то можно привести следующие результаты. В принципе все вышеизложенное можно интерпретировать и как анализ для данного случая, здесь нужно только считать, что, якобы, регулятор настроен по параметрам объекта управления, имевшим место в недалеком прошлом, а в данный момент времени объект управления имеет те значения параметров, которые указаны в заголовках таблиц.

Если постоянная времени и время запаздывания объекта изменятся соответственно на $\Delta T_{об}$ и на $\Delta \tau_{об}$, а регулятор будет иметь настройку, найденную по предыдущим значениям его параметров

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$, то передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W_{pc}(p) = \frac{\exp(-\tau_{об} p) \cdot \exp(-\Delta \tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{об}) p (1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$$

Используя критерий устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием [7], нашли, что в этом случае критическая частота $\omega_{кр}$ будет равна

$$\omega_{кр} = \frac{1}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$$

поэтому условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования (САР) в общем случае запишется так:

$$(\tau_{об} + \Delta \tau_{об}) / [(\theta + \tau_{об}) \cdot (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2. \quad (5)$$

На координатной плоскости « $\Delta T_{об} / T_{об}$ – $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » граница области устойчивости будет представляться следующей прямой (см. рисунок):

$$\frac{\Delta \tau_{об}}{\tau_{об}} = \frac{\pi(\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} \cdot (1 + \frac{\Delta T_{об}}{T_{об}}) - 1. \quad (6)$$

На рисунке область устойчивости – это область, расположенная правее своей границы (штриховка направлена внутрь области). Причем, нетрудно заметить, что с увеличением параметра θ область устойчивости замкнутой САР расширяется, т. к. $(\frac{\pi \cdot (\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} - 1)$ – точка пересечения

прямой (3) с осью ординат « $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » с увеличением θ «ползет» вверх, а $(\frac{2\tau_{об} - \pi\tau_{об} - \pi\theta}{\pi \cdot (\tau_{об} + \theta)})$ – точка

пересечения прямой (6) с осью абсцисс « $\Delta T_{об} / T_{об}$ » перемещается влево. При $\theta=0$ область устойчивости будет иметь наименьший размер, однако при этом начало координат будет располагаться все-таки правее ее границы. Следовательно, при $\theta=0$ САР имеет некоторый запас устойчивости относительно вариаций параметров $\Delta \tau_{об}$ и $\Delta T_{об}$, с увеличением θ робастность устойчивости [8] повышается.

Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию будет равна

$$W_{zc}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})p + \exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}$$

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение САР будет иметь вид:

$$(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = U(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}), \quad (7)$$

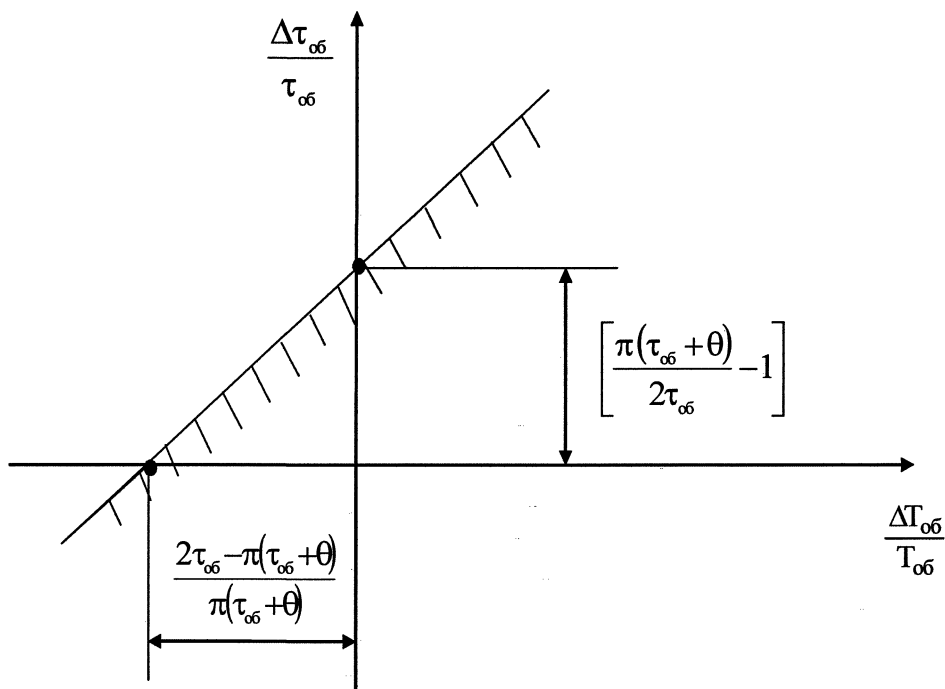


Рис. 1. Область устойчивости САР

где x – выходная (регулируемая) величина объекта, U – заданное значение регулируемой величины. Из (5) и из решения дифференциального уравнения (7) следует, что при $\Delta T_{об} > 0$ влияние этого параметра на устойчивость (робастность устойчивости) и качество (робастность качества) САР аналогично влиянию параметра θ [2, 3], т. е. колебательность переходной функции уменьшается с ростом $\Delta T_{об}$, переходный процесс все в большей степени приобретает аperiodический характер.

Для примера в табл. 3 приведены показатели качества переходных процессов в САР для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ % хода ИМ ед. рег. вел., $\Delta\tau_{об} = 0$, а $\Delta T_{об}$ принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Аналогичные результаты получаются и при $\Delta\tau_{об} < 0$, т. е. с увеличением $|\Delta\tau_{об}|$ демпфированность системы растет. Если же $\Delta\tau_{об} > 0$, то с увеличением $\Delta\tau_{об}$ перерегулирование возрастает, ухудшаются как качество переходного процесса, так и запас устойчивости системы. В табл. 4 приведены показатели качества переходных процессов в САР для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ % хода ИМ ед. рег. вел., $\Delta T_{об} = 0$, а $\Delta\tau_{об}$ принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Выполненные расчеты показали, что если параметры объекта управления определены точно, то при $\theta = 0$ с перерегулирование в данной САР будет равно $\sigma \cong 49\%$. Если же время запаздывания

Таблица 3
Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta T_{об}$

$\Delta T_{об}, с$	+1	+3	+5	-1	-3	-5
$\sigma, \%$	41,89	31,79	23,89	55,02	72,49	97,04
$t_p, с$	42	33,2	32,2	51,6	88,6	157

Таблица 4
Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta\tau_{об}$

$\Delta\tau_{об}, с$	+1	+2	+3	-1	-2	-3
$\sigma, \%$	67,99	87,99	расходящийся переходный процесс	28,22	9,98	0,0005
$t_p, с$	85	195,6	расходящийся переходный процесс	26,4	15	9,8

модели объекта управления $\tau_{об}$ (эта величина используется при вычислении настройки регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$) меньше времени запаздывания, имею-

щего место на реальном объекте ($\tau_{об} + \Delta\tau_{об}$), то перерегулирование возрастает. Так, например, если $\tau_{об} = 4$ с, а $\Delta\tau_{об} = 1$ с, то $\sigma = 72\%$. САР в такой ситуации, когда из-за погрешности параметрической идентификации получилось, что $\tau_{об} < (\tau_{об} + \Delta\tau_{об})$, может и потерять устойчивость. В самом деле, если структура математической модели объекта и все ее параметры, кроме времени запаздывания, определены достаточно точно, то передаточная функция разомкнутой системы получается равной

$$W_{pc}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})p},$$

устойчива лишь при удовлетворении следующего неравенства: $(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})/(\theta + \tau_{об}) < \pi/2$. В случае табл. 4, при $\Delta\tau_{об} = 3$ с получили расходящийся переходный процесс, т. е. система потеряла устойчивость, что и следовало ожидать, т. к.

$$(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})/(\theta + \tau_{об}) = (5 + 3)/5 > \pi/2.$$

При отработке единичного ступенчатого задания $U(t) = 1(t)$ при $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow 1$, т. е. САР астатическая по задающему воздействию. Передаточная функция системы по каналу «возмущение со стороны регулирующего органа – ошибка регулирования»

$$W_{zc}^{po}(p) = \frac{(\tau_{об} + \theta) \cdot \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(T_{об} + \Delta T_{об})p + T_{об} \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]},$$

поэтому $\lim_{p \rightarrow 0} W_{zc}^{po}(p) = \frac{\tau_{об} + \theta}{T_{об}}$ при $p \rightarrow 0$, следова-

тельно, по данному каналу САР статическая, причем ошибка регулирования тем меньше, чем больше коэффициент передачи П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau + \theta}$.

Выводы. Проведенный анализ показал, что рассматриваемый метод синтеза, позволяющий од-

нозначно выбрать как структуру, так и параметры настройки регулятора уровня жидкостей, обеспечивает приемлемое качество переходных процессов и достаточный запас устойчивости системы при довольно заметных по размерам вариациях параметров объекта управления и погрешностях задания настроек регулятора. Поэтому данный метод синтеза можно достаточно уверенно рекомендовать для практического использования.

Литература

1. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
2. Панферов, В.И. Об одном подходе к решению задачи выбора и настройки автоматических регуляторов / В.И. Панферов // Известия Челябинского научного центра. – 2004. – Вып. 4 (26). – С. 139–144.
3. Панферов, В.И. Выбор и настройки автоматических регуляторов в системах теплоснабжения / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2005. – Вып. 3 – № 13 (53). – С. 81–84.
4. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.П. Копелович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.
5. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шапировский; под ред. Г.М. Глинкова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
6. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973. – 190 с.
7. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
8. Дорф, Р. Современные системы управления: пер. с англ. / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2009 г.

Панферов Сергей Владимирович, аспирант кафедры «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование процессов в сложных системах управления.

Контактный телефон: 267-91-44.

Panferov Sergey Vladimirovich. Post-graduate student of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miass branch of SUSU.

Scientific interests: simulation of processes in difficult control systems.

Contact phone: 267-91-44.

Телегин Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование процессов в системах управления механическими и энергетическими объектами.

Контактный телефон: 8 (3513) 53-22-61.

Telegin Alexander Ivanovich. Doctor of physical and mathematical science, professor, the head of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miass branch of SUSU.

Scientific interests: simulation of processes in control systems of mechanical and power objects.

Contact phone: 8 (3513) 53-22-61.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОГРЕЙНЫХ АППАРАТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

Б.Н. Курицын, О.Н. Медведева, А.А.Иванов

RESEARCH OF THERMAL EFFICIENCY THE WATER-HEATING DEVICES WORKING ON GAS FUEL

B.N. Kuritsyn, O.N. Medvedeva, A.A. Ivanov

В статье приводятся результаты технико-экономических исследований тепловой эффективности аппаратов и оборудования, работающих на газовом топливе. Приводится алгоритм определения относительного коэффициента полезного действия и результаты экспериментальных исследований бытовой газовой аппаратуры по оценке их тепловой эффективности.

Ключевые слова: водогрейные аппараты, тепловая эффективность, газовое топливо, коэффициент полезного действия.

The article gives the results of technical and economic researches of thermal effectiveness of devices and equipment working on gas fuel. The algorithm of definition of relative coefficient of efficiency and results of experimental researches of the household gas equipment according to their thermal efficiency estimation are given.

Keywords: water-heating devices, thermal effectiveness, gas fuel, coefficient of efficiency.

При использовании газообразного топлива на бытовые нужды населения применяются различные аппараты и оборудование (отопительные печи, газовые водогрейные котлы, водонагреватели, бытовые газовые плиты и т. д.).

Тепловая эффективность бытовых газовых установок оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), который представляет собой отношение полезно воспринятого тепла теплоприёмником к затраченному или к подведенной тепловой мощности.

Максимальная эффективность использования газа обеспечивается при работе аппаратов на номинальном режиме эксплуатации, то есть при номинальной подведенной тепловой мощности $N_{\text{ном}}$, которой соответствует номинальное давление газа

перед установкой $P_{\text{ном}}$. В реальных условиях эксплуатации бытовые газовые приборы работают в режимах, отличающихся от номинального, то есть при повышенном или пониженном давлении газа перед прибором.

Предельно допустимые давления газа для бытовых газовых приборов: максимальное P_{max} , минимальное P_{min} , а также номинальное давление $P_{\text{ном}}$ приводятся в таблице 1.

В диапазоне давлений $P_{\text{min}} \leq P \leq P_{\text{max}}$ газоиспользующие установки обеспечивают устойчивое горение газа без отрыва и проскока пламени, необходимую полноту его сжигания с высоким коэффициентом полезного действия. Однако следует отметить, что эксплуатация газоиспользующих установок в режиме, отличном от номинального

Номинальное давление газа перед бытовыми газовыми приборами

Таблица 1

Газовый прибор	P_{max} , Па	$P_{\text{ном}}$, Па	P_{min} , Па	Нормативный документ
Газовая плита	1764	1274	147	ГОСТ 10798–85
	2744	1960	196	
Проточный водонагреватель	1764	1274	637	ГОСТ 19910–74
	2744	1930	980	
Отопительный котел	1764	1274	635	ГОСТ 20219–74
	2744	1960	980	
Газовая горелка для отопительной печи УГОП	1800	1300	600	ГОСТ 16569–86
	2800	2000	1000	

(при повышенном или пониженном давлении газа), снижает тепловую эффективность использования газа, то есть КПД газоиспользующих установок.

Характерный график эксплуатационных параметров газоиспользующих установок в зависимости от относительного давления газа (относительной подведенной мощности) приводится на рисунке.

Как видно из графика (см. рисунок), максимальное значение КПД обеспечивается при отношении $P/P_{\text{ном}} = 1$. При отношении $P/P_{\text{ном}} > 1$ КПД газоиспользующей установки снижается за счет повышенной температуры уходящих продуктов сгорания. Аналогичная ситуация имеет место при отношении $P/P_{\text{ном}} < 1$. Уменьшение КПД газоиспользующей установки обуславливается тем обстоятельством, что при снижении давления, а значит и количества сжигаемого газа, возрастает коэффициент избытка воздуха, подаваемого в зону горения за счет естественной тяги или вентилятора. Это приводит к снижению КПД, несмотря на уменьшение температуры продуктов сгорания.

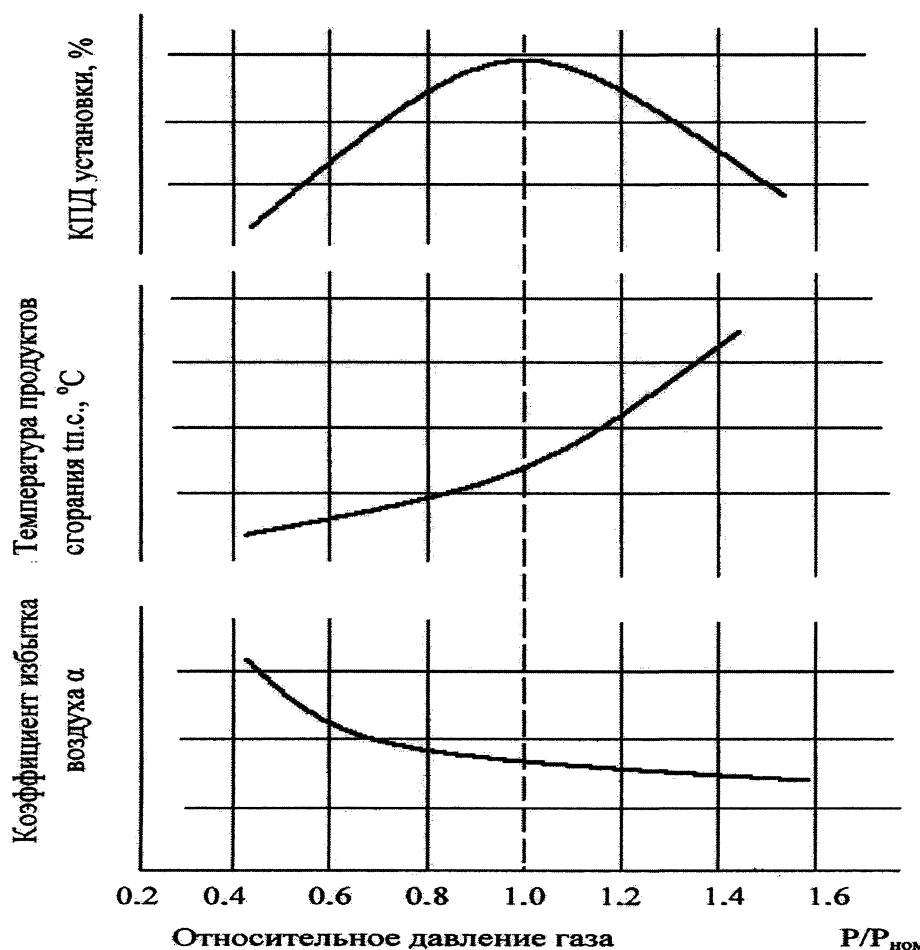
Согласно ГОСТ на испытание газовых водогрейных аппаратов [2, 3], экспериментальное определение КПД требует измерения расхода и темпе-

ратурного диапазона нагрева воды, а также расхода газа и теплоты его сгорания. Относительно небольшие изменения КПД газоиспользующих аппаратов в диапазоне рабочих режимов их эксплуатации (несколько процентов) предъявляют высокие требования к точности экспериментальных исследований, к минимизации погрешности средств измерения и контроля, методике обработки экспериментальных данных.

Указанное обстоятельство обуславливает повышенную трудоёмкость экспериментальных работ, требует применения высокоточной измерительной техники, специальных методов статистической обработки экспериментальных материалов.

Поэтому при проведении сертификационных испытаний газовых водогрейных аппаратов коэффициент полезного действия последних определяется, как правило, только при номинальном режиме эксплуатации, то есть при максимальной тепловой эффективности.

Экспериментальные исследования водогрейных газовых аппаратов существенно упрощаются, если оценивать их тепловую эффективность с помощью относительного КПД. Последний представляет собой отношение КПД газового аппарата



Зависимость КПД, температуры продуктов сгорания и коэффициента избытка воздуха за газоиспользующей установкой от относительного давления газа [1]

при текущем и номинальном режимах эксплуатации:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

тогда используя уравнение:

$$\eta = \frac{mc(t_2 - t_1)}{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (2)$$

можно записать:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{mc(t_2 - t_1)B_{\text{ном}}Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}m_{\text{ном}}c(t_2^{\text{ном}} - t_1^{\text{ном}})} = \frac{m(t_2 - t_1)B_{\text{ном}}}{Bm_{\text{ном}}(t_2^{\text{ном}} - t_1^{\text{ном}})}, \quad (3)$$

где m – расход нагреваемой воды, кг/ч; c – удельная теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C); t_1 – температура воды на входе в аппарат, °C; t_2 – температура воды на выходе из аппарата, °C; B – расход газа, м³/ч; Q_{H}^{P} – низшая теплота сгорания газа, МДж/м³.

При постоянстве расхода воды в текущем и номинальном режимах эксплуатации, то есть при $m = m_{\text{ном}}$ уравнение (3) принимает следующий вид:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{B_{\text{ном}}}{B} \frac{t_2 - t_1}{t_2^{\text{ном}} - t_1^{\text{ном}}}. \quad (4)$$

Как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, расход газа газоиспользующим аппаратом B , м³/ч, связан с давлением газа P , Па, следующим соотношением [4]:

$$B = b\sqrt{P}, \quad (5)$$

где b – проводимость аппарата, м³/(ч·Па^{1/2}).

Тогда по (4) с учетом (5) имеем:

$$\eta_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ном}}}{P}} \frac{t_2 - t_1}{t_2^{\text{ном}} - t_1^{\text{ном}}}, \quad (6)$$

где P , $P_{\text{ном}}$ – текущее и номинальное давление газа перед газовым аппаратом, Па.

Как видно из (6), экспериментальное определение относительного КПД требует только измерения давления газа перед газовым водогрейным аппаратом и температурных параметров нагреваемой воды.

Абсолютное значение КПД определяется пересчетом по формуле (1):

$$\eta = \eta_{\text{отн}} \eta_{\text{ном}}, \quad (7)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – максимальный КПД аппарата, соответствующий номинальному режиму его эксплуатации. Значения $\eta_{\text{отн}}$, полученные по результатам сертификационных испытаний, приводятся в паспортных данных газовых водогрейных аппаратов.

Определение КПД газовых водогрейных котлов и водонагревателей проводилось на экспериментальной установке. Испытания проводились в соответствии с нормативной методикой [2, 3] в РИЦ ГАО института «Гипронефтегаз» и в учебно-исследовательской лаборатории кафедры «Теплогоснабжение и вентиляция» Саратовского ГТУ.

В качестве объектов испытаний использовались: котлы АОГВ-10, «Хопер», «Proterm», а также газовые водонагреватели «Аврора» и ВПГ-10.

Испытания газовых аппаратов проводились при следующих значениях начальной температуры воды:

- котлы газовые водогрейные $t_1 = 40$ °C;
- газовый проточный водонагреватель $t_1 = 18$ °C.

Конечная температура воды на выходе из аппаратов при их работе на номинальном режиме эксплуатации ($P_{\text{ном}} = 200$ даПа) обеспечивалась в следующих пределах:

- котлы газовые водогрейные $t_2^{\text{ном}} = 60$ °C;
- газовый проточный водонагреватель $t_2^{\text{ном}} = 58$ °C.

Как показывает анализ экспериментальных данных, режимы эксплуатации газовых аппаратов оказывают существенное влияние на эффективность использования газового топлива. Так, например, при эксплуатации котла АОГВ-10 на номинальном режиме при давлении 200 даПа относительный КПД составляет единицу, а при снижении давления до 75 даПа, то есть при снижении тепловой мощности до 2/3 от номинальной, относительный КПД снижается до 0,947, то есть более чем на 5%. Аналогичная ситуация наблюдается и при повышенном давлении газа. В целях оценки погрешности результатов исследований была проведена статистическая обработка экспериментальных материалов.

Как показывают результаты статистического анализа, результирующая погрешность определения относительного КПД котла АОГВ-10 в исследуемом диапазоне изменения давления газа находится в пределах 1,4–2,1 с доверительной вероятностью 0,95, что соответствует требованию ГОСТ к точности экспериментальных исследований.

Аналогичные результаты получены и по другим типам газовых водогрейных аппаратов.

Обработка массива экспериментальных данных методами корреляционного анализа выявила тесную связь между исследуемой функцией $\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{ном}}}$ и

управляющим параметром $P_{\text{отн}} = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$.

Результаты экспериментальных исследований аппроксимируются следующей зависимостью с коэффициентом корреляции 0,8877:

$$\eta_{\text{отн}} = -0,5136 P_{\text{отн}}^6 + 2,3548 P_{\text{отн}}^5 - 3,0664 P_{\text{отн}}^4 - 0,7648 P_{\text{отн}}^3 + 4,4265 P_{\text{отн}}^2 - 2,9919 P_{\text{отн}} + 1,553. \quad (8)$$

Наличие указанной зависимости обеспечивает необходимые предпосылки к оптимизации гидравлических режимов эксплуатации распределительных систем газоснабжения с учетом эффективности использования газового топлива у потребителей.

Литература

1. Эстеркин, Р.И. КПД котельных агрегатов при сжигании газа / Эстеркин Р.И. // Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра, 1975. – № 4. – С. 407–412.

2. ГОСТ 51733–2001. Котлы газовые центральные отопления, оснащенные атмосферными горелками номинальной тепловой мощностью до 70кВт. Требования безопасности и методы испытаний. – М.: Госстандарт России, 2001. – 58 с.

3. ГОСТ Р 51847–2001. Аппараты водонагре-

вательные проточные газовые бытовые типа А и С. Общие технические условия. – М.: Госстандарт России, 2002. – 26 с.

4. Ионин, А.А. Газоснабжение / А.А. Ионин. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.

Поступила в редакцию 10 марта 2009 г.

Курицын Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета.

Область научных интересов: системы газоснабжения.

Kuritsyn Boris Nikolaevich, doctor of Engineering Science, professor, the head of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of Saratov State Technical University.

Scientific interests: systems of gas supply.

Медведева Оксана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета.

Область научных интересов: исследования в области оптимизации межпоселковых и распределительных систем газоснабжения.

Medvedeva Oksana Nikolaevna, candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of Saratov State Technical University.

Scientific interests: researches in the field of optimization of inter-settlement and distributive systems of gas supply.

Иванов Антон Александрович, аспирант кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Саратовского государственного технического университета.

Область научных интересов: исследования в области надежного снабжения потребителей сетевым газом, оптимизация систем газоснабжения.

Ivanov Anton Aleksandrovich, post-graduate student of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of the Saratov State Technical University.

Scientific interests: researches in the field of reliable supply of consumers with network gas, optimization of gas supply systems.

Контактный телефон: 8 (8452) 52-57-97.

Contact phone: 8 (8452) 52-57-97.

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

1. В редакцию предоставляется печатный вариант статьи и ее электронная версия (документ Microsoft Word), экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати, сведения об авторах (Ф.И.О., место работы, ученая степень, звание и должность, контактная информация (телефон, e-mail)).

2. Один автор может опубликовать в одном сборнике не более двух статей.

3. Структура статьи: УДК, название, список авторов, аннотация (не более 500 знаков), список ключевых слов, текст работы, литература (ГОСТ 7.1–2003). На отдельной странице приводятся название, аннотация, список ключевых слов и сведения об авторах на английском языке.

4. Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее – 23, нижнее – 23, левое – 22, правое – 25 мм. Шрифт – Times New Roman, кегль – 14. Отступ красной строки 0,7 см, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – полуторный. Рисунки и схемы должны быть сгруппированы и иметь названия.

5. Адрес редакции научного журнала «Вестник ЮУрГУ» серии «Строительство и архитектура»: Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, ауд. 612. Тел./факс (351) 267-91-71, ответственному редактору профессору Асташкину Владимиру Михайловичу, ответственному секретарю Кравченко Татьяне Александровне.

6. Полную версию правил подготовки рукописей и пример оформления можно загрузить с сайта ЮУрГУ (<http://www.susu.ac.ru>), следуя ссылкам: «Научные исследования», «Издательская деятельность», «Вестник ЮУрГУ», «Серии».

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 16(149) 2009

**Серия
«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»
Выпуск 8**

Редактор Е.П. Павлухина
Компьютерная верстка С.В. Буновой

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 13.04.2009. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,13. Тираж 500 экз. Заказ 113/162.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.