

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 3 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:

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

Адрес редакции:

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

Редакторы: С.В. Сватковская,
М.А. Сухова,
В.С. Кулакова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:
36946 в каталоге Роспечати

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

Подписано к печати 20.05.2013.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 20,4. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 104.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
2(16)/2013**

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ 4

**Макридин Н.И., Скачков Ю.П.,
Максимова И.Н., Суров И.А.**
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО
ПОВЕДЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНА ИЗ
ГОРНЫХ ПОРОД. ЧАСТЬ 2. ИДЕНТИФИ-
КАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ 4

Данилов А.М., Круглова А.Н., Селяев В.П.
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭПОКСИДНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ АППРЕТИРОВАНИЯ 13

Логанина В.И., Акжигитова Э.Р.
ОЦЕНКА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ
МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ
ДОБАВОК 20

**Макридин Н.И., Тараканов О.В.,
Максимова И.Н., Суров И.А.**
ФАКТОР ВРЕМЕНИ В ФОРМИРОВАНИИ
ФАЗОВОГО СОСТАВА СТРУКТУРЫ
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ 26

Вернигорова В.Н., Саденко Д.С.
ВОДА ЗАТВОРЕНИЯ КАК
МИКРОГЕТЕРОГЕННАЯ ОРГАНИЗОВАННАЯ
СРЕДА 32

Низина Т.А., Балбалин А.В.
МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ЦЕМЕНТНЫХ
СМЕСЕЙ С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ
ДОБАВКАМИ 36

**Низина Т.А., Кочетков С.Н.,
Пономарев А.Н., Козеев А.А.**
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ
НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ
И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА
ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК 43

Гаврилов М.А., Вернигорова В.Н.
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ 50

© Авторы публикаций, 2013
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2013
© ПГУАС, 2013

Фокин Г.А., Тетюшева О.В., Гуськов А.С. ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ДИСПЕРСНЫЕ СРЕДЫ	57	Вилкова Н.Г., Еланева С.И., Шумкина А.А., Дорчина О.В. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	115
Вернигорова В.Н., Саденко Д.С., Вернигоров М.М. МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ	62	Обухов И.А., Москалец П.В. ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ	120
Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Саденко Д.С. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА НА ЕГО ВОДОРЕДУЦИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ	66	Горшков В.И., Мирошниченко Д.С., Святкина А.А., Тараканов О.В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ	125
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	71	Баканова С.В., Кубис В.А. ПРЕДЕЛЬНО ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ	132
Бакушев С.В. УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ СТЕРЖНЯ С ДВУМЯ ОСЯМИ СИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ НАГРУЗКОЙ	71	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ	138
Вдовин В.М., Мухаев А.И., Арискин М.В. К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОЕДИНЕННЫХ ЦЕНТРОВЫМИ ВКЛЕЕННЫМИ ШПОНКАМИ	81	Будылина Е.А., Данилов А.М., Гарькина И.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	138
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	91	Данилов А.М., Гарькина И.А. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ПОЗИЦИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ	143
Гришин Б.М., Кошев А.Н., Ласьков Н.Н., Бикунова М.В. УДАЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКИСЛИТЕЛЕЙ	91	Хрусталева Б.Б., Логанина В.И., Учаева Т.В. ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ МАРКЕТИНГА	147
Будылина Е.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ: НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА – ГОРДОНА	98	Хрусталева Б.Б., Ганиев М.Г. ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СФЕРЫ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАРКЕТИНГОВОГО ПОДХОДА	153
Прохоров С.Г., Кожунов А.А., Родионов Ю.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПУТЕМ ПОДОГРЕВА ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА ...	103	Грабовый П.Г., Матвеев М.С. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНВЕСТИЦИОННО- СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА Г. ПЕНЗЫ НА ОСНОВЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ПОДХОДОВ	159
Королева Т.И., Салмин В.В., Ежов Е.Г., Иващенко Н.Ю. ОПЫТ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБ- ЛЕНИЯ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА	109		

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	4	Vdovin V.M., Muhaev A.I., Ariskin M.V. TO THE ESTIMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF WOODEN ELEMENTS CONNECTED BY PIVOT GLUED DOWELS	81
Makridin N.I., Skachkov Y.P., Maksimova I.N., Surov I.A. INTEGRATED ASSESSMENT OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCK CONCRETE FILLERS. PART 2. IDENTIFICATION OF THE DESTRUCTION PROCESS	4	ENGINEERING SYSTEMS	91
Danilov A.M., Kruglova A.N., Seljaev V.P. QUALITY CONTROL OF EPOXY COMPOSITES USING COATED FILLERS..	13	Grishin B.M., Koshev A.N., Laskov N.N., Bikunova M.V. AZO COMPOUNDS REMOVAL OUT OF SEWAGE USING OXIDIZERS	91
Loganina V.I., Akzhigitova E.R. EVALUATION OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF COATINGS BASED ON DRY BUILDING MIXES WITH MINERAL AND ORGANIC ADDITIVES	20	Budylna E.A. SYSTEMS MODELLING: SOME APPLICATIONS OF KLEIN – GORDON EQUATION.....	98
Makridin N.I., Tarakanov O.V., Maksimova I.N., Surov I.A. TIME FACTOR IN FORMATION OF CONCRETE BLOCK MODIFIED STRUCTURE PHASE COMPOSITION	26	Prohorov S.G., Kozhunov A.A., Rodionov J.V. IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF LOW POWER BOILERS BY HEATING THE BLAST AIR.....	103
Vernigorova V.N., Sadenko D.S. MIXING WATER AS MICROHETEROGENEOUS ORGANIZED ENVIRONMENT	32	Korolev T.I., Salmin V.V., Ezhov E.G., Ivashchenko N.Y. BUILDING HEAT CONTROL BY UPGRADING INDIVIDUAL HEATER	109
Nizina T.A., Balbalin A.V. MECHANICAL ACTIVATION OF CEMENT MIXTURES WITH MULTIFUNCTIONAL ADDITIVES	36	Vilkova N.G., Elaneva S.I., Shumkina A.A., Dorchina O.V. WASTE WATER PURIFICATION: OUTLOOKS OF STRUCTURAL DISPERCED SYSTEMS APPLICATION	115
Nizina T.A., Kochetkov S.N., Ponomarev A.N., Kozeev A.A. INFLUENCE EFFICIENCY ASSESSMENT OF NANOMODIFIERS ON THE STRENGTH AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES DEPENDING ON THE TYPE OF PLASTICIZING ADDITIVES.....	43	Obukhov I.A., Moscalets P.V. PROTECTION OF POPULATION AND TERRITORIES IN EMERGENCY SITUATIONS.....	120
Gavrilov M.A., Vernigorova V.N. EPOXY-RESIN BASED COMPOSITE MATERIALS.....	50	Gorshkov V.I., Miroshnichenko D.S., Svyatkina A.A., Tarakanov O.V. FORECASTING OF VENTILATION SYSTEMS FAILURE	125
Fokin G.A., Tetyusheva O.V., Guskov A.S. INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY ULTRASONIC FLUCTUATIONS OF LOW POWER ON DISPERSE ENVIRONMENTS .	57	Bakanova S.V., Kubis V.A. MAXIMUM PROBABILISTIC METHOD OF MICROCLIMATE ASSESSMENT IN STORE-ROOMS FOR PERISHABLE GOODS	132
Vernigorova V.N., Sadenko D.S., Vernigorov M.M. SURFACE MORPHOLOGY OF CALCIUM HYDROSILICATES	62	ECONOMICS AND MANAGEMENT ..	138
Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Sadenko D.S. INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZER INTRODUCTION ON WATER-REDUCING EFFECT	66	Budylna E.A., Danilov A.M., Garkina I.A. MODELLING FROM THE VIEW OF CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	138
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	71	Danilov A.M., Garkina I.A. EDUCATIONAL SYSTEM FROM THE VIEW POINT OF IDENTIFICATION AND MANAGEMENT	143
Bakushev S.V. ELASTOPLASTIC ROD BEND WITH TWO AXES OF DISTRIBUTING LOADING SIMMETRY.....	71	Khrustalev B.B., Loganina V.I., Uchaeva T.V. ASSESSMENT PARAMETERS OF CONSTRUCTION INDUSTRY ENTERPRISES BASED ON MARKETING	147
		Khrustalev B.B., Ganiev M.G. FORMATION OF ENTERPRISE DEVELOPMENT STRATEGY IN SPHERE OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES BASED ON USE OF MARKETING APPROACH	153
		Grabovoy P.G., Matveev M.S. INVESTMENT AND CONSTRUCTION COMPLEX DEVELOPMENT OUTLOOKS IN PENZA BASED ON MARKETING APPROACHES	159

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.21

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

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

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

Максимова Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Стандартизация, сертификация
и аудит качества»

E-mail: maksimovain@mail.ru

Суров Иван Александрович,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Makridin Nikolay Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Technologies of building
materials and wood processing»

Skachkov Yuri Petrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Pussian Academy of Architectural and
Building Science, rector, Professor of the
department «Building designs»

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Standartization,
certification, quality audit»

E-mail: maksimovain@mail.ru

Surov Ivan Aleksandrovich,
Postgraduate of the department «Technologies
of building materials and wood processing»

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНА ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД. ЧАСТЬ 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

Н.И. Макридин, Ю.П. Скачков, И.Н. Максимова, И.А. Суров

Представлены результаты анализа графических зависимостей изменения генерируемых ультразвуковых импульсов акустической эмиссии на диаграмме нагружения образцов горных пород разного генезиса.

Ключевые слова: заполнители для бетона, горные породы, механические свойства, акустические параметры, процесс разрушения, трещиностойкость.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCK CONCRETE FILLERS. PART 2. IDENTIFICATION OF THE DESTRUCTION PROCESS

N.I. Makridin, Y.P. Skachkov, I.N. Maksimova, I.A. Surov

The results of the graphic dependences analysis of the acoustic emission generatable ultrasonic change pulses on the load diagram of the rocks models of different genesis are represented.

Keywords: fillers of the concrete, rocks, mechanical properties, acoustic parameters, process of destruction, resistance to cracks.

Как известно, в обычном бетоне доля заполнителей занимает до 80 % его объема, при этом большая часть этого объема приходится на крупный заполнитель. Основным параметром бетона, являющийся определяющим при подборе состава, – его прочность, на которую существенное влияние оказывают зерновой состав, прочность и чистота заполнителя. Поэтому правильный выбор заполнителей для бетона, их разумное использование – одна из важнейших задач технологии бетона [1].

В соответствии с современным подходом механика разрушения композитных материалов связывает реальную прочность материала с его энергией разрушения, модулем упругости и размером дефекта, обуславливающим начало разрушения [2]. При этом важнейшим параметром механического поведения структуры материала является трещиностойкость, характеризующая способность материала тормозить развитие дефектов структуры и предопределяющая способность материала как противостоять хрупкому разрушению, так и сопротивляться развитию постепенного разрушения в течение заданного времени.

В этой связи оценка параметров трещиностойкости природных каменных материалов, используемых в качестве заполнителей для бетонов, влияющих на фактор реальной прочности цементного композита, представляет не только теоретический интерес, но и большую практическую ценность, так как выбор заполнителей, особенно для бетонов нового поколения высокой и сверхвысокой прочности, характеризующихся повышенной хрупкостью, приобретает особую значимость при оценке их надежности и долговечности при силовых и несиловых воздействиях.

Ранее [3] были приведены параметры конструкционной прочности горных пород и представлены амплитудно-энергетическое распределение суммарной энергии импульсов акустической эмиссии (АЭ) и дифференциальное приращение энергии импульсов АЭ на этапах нагружения опытных образцов, экспериментальная оценка которых проведена в соответствии с методическими рекомендациями ГОСТ 29167 с использованием метода АЭ для оценки самого процесса разрушения опытных образцов. Анализ суммарной энергии импульсов АЭ и дифференциального приращения энергии импульсов АЭ на диаграммах нагружения образцов сравниваемых горных пород показал, что излучение акустических волн напряжений, вызванное внутренней динамической перестройкой структуры рассматриваемых материалов под воздействием силовой нагрузки, имеет существенное качественное и количественное различие.

В данной работе представлены результаты исследования изменения генерируемых ультразвуковых (УЗ) импульсов АЭ в зависимости от вида породы и интенсивности нагружения. Технические характеристики акустико-эмиссионного устройства приведены в работе [4].

В опытах регистрировали амплитуды импульсов АЭ на двух уровнях A_1 и A_2 : первый уровень в диапазоне 0,05-0,5 В, второй уровень – выше 0,5 В. Нагружение образцов типа I по ГОСТ 29167-91 производили ступенями в 0,1 ожидаемой прочности при изгибе. Скорость движения подвижного захвата испытательной машины FM-1000 во всех опытах была одинаковой и составляла $166 \cdot 10^{-7}$ м/с. На каждой ступени нагружения образцы выдерживали в течение одной минуты до прекращения АЭ.

Излучение импульсов АЭ отражает развитие деформирования и разрушения материала на разных масштабных уровнях и разную природу генерируемых сигналов, в основе которых лежат различные физические явления: пластические деформации,

характеризующиеся УЗ-импульсами АЭ относительно малой амплитуды A_1 , а возникновение и развитие дефектов структуры материала излучают сигналы АЭ относительно большой амплитуды A_2 . Измерение параметров указанных импульсов позволяет не только обнаруживать развитие дефектов и оценивать механическое поведение и параметры предельного состояния структуры, но и выявлять параметры материала, определяющие его трещиностойкость, понимание которых позволяет рекомендовать технологам оптимальные пути создания конструкционных бетонов нового поколения и реализации основной идеи разработки композиционных строительных материалов, заключающейся в соединении высокой прочности с хорошей вязкостью разрушения.

На рис. 1-4 представлена кинетика развития УЗ-импульсов АЭ N_1 и N_2 с дискриминационными амплитудами, соответственно A_1 и A_2 и соотношение количества УЗ-импульсов N_1/N_2 малых и больших амплитуд на кривой нагружения опытных образцов из гранита, мрамора, известняка и арктического туфа, по которым проводили идентификацию процесса разрушения в реальном масштабе времени.

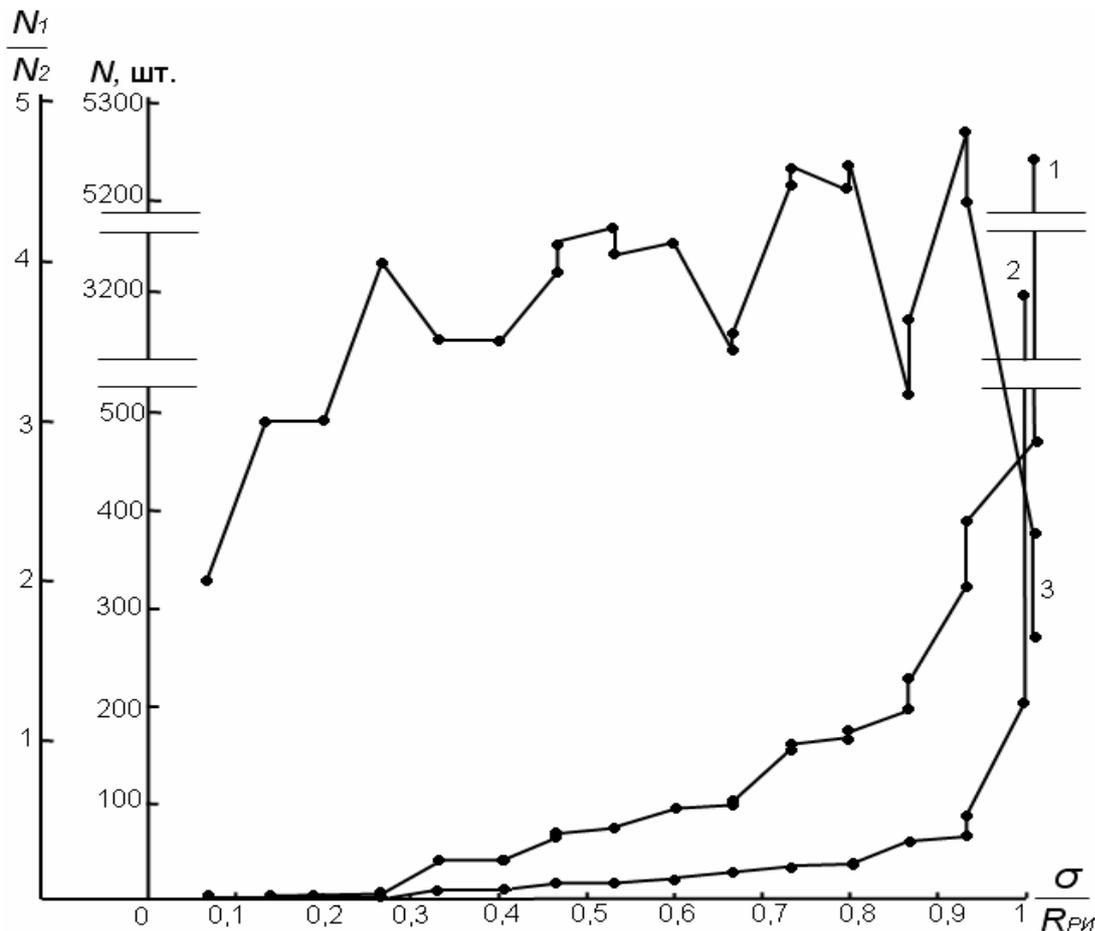


Рис. 1. Зависимость количества (N_1 и N_2) сигналов АЭ соответственно с амплитудами A_1 и A_2 и отношения N_1/N_2 образцов гранита типа I по ГОСТ 29167 при трехточечном изгибе от интенсивности нагружения:

1 – амплитуда сигнала АЭ $A_1 = 0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2 > 0,5$ В;

3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ

Из анализа зависимостей (см. рис. 1-4) следует, что при прочих равных условиях регистрации параметров АЭ интенсивность сигналов и характер изменения излучения параметров от уровня нагружения опытных образцов из материалов сравниваемых горных пород существенно отличаются друг от друга, что позволяет судить о прочностных свойствах материала, о развитии пластической и хрупкой составляющей процесса разрушения в режиме реального времени, а также прогнозировать дальнейшую работоспособность и предельные состояния структуры материала.

Так, первые сигналы АЭ с амплитудой A_1 на диаграммах нагружения образцов гранита, мрамора, известняка и туфа (см. рис. 1-4) зарегистрированы соответственно при уровнях нагружения $0,067; 0,66; 0,4$ и $0,2 \cdot R_{pu}$, а сигналы АЭ с амплитудой A_2 – соответственно при уровнях нагружения $0,333; 0,89; 0,4$ и $0,6 \cdot R_{pu}$. При этом количество УЗ-импульсов АЭ N_1 и N_2 с амплитудами A_1 и A_2 при предельном уровне нагружения $0,9-0,96$ составляло соответственно 387 и $88; 190$ и $58; 183$ и $9; 158$ и 24 , что соответствует отношению $N_1(A_1)/N_2(A_2)$, равному $4,4; 3,3; 20$ и $6,6$. При полном разрушении сравниваемых образцов было зарегистрировано УЗ-импульсов с амплитудами A_1 и A_2 соответственно 5243 и $3196; 1130$ и $396; 1177$ и $481; 824$ и 460 , что соответствует отношению $N_1(A_1)/N_2(A_2)$, равному $1,64; 2,85; 2,45; 1,79$.

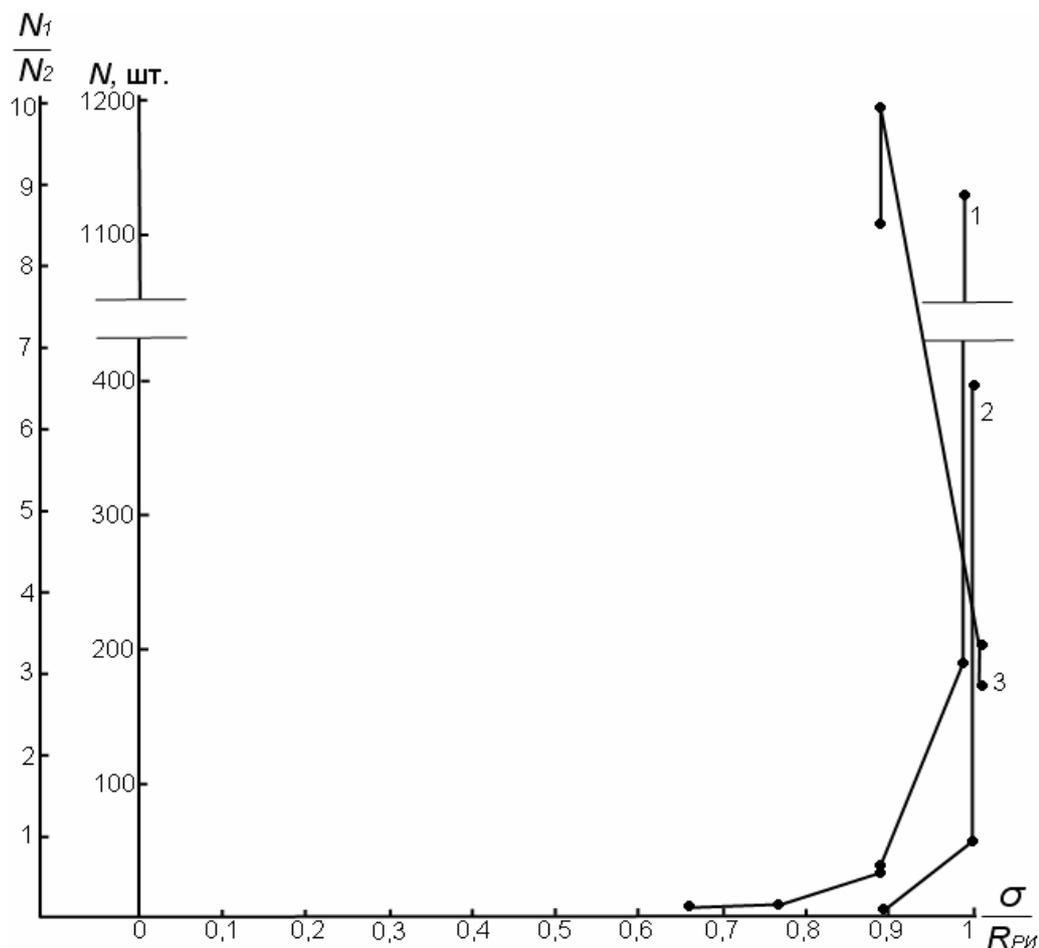


Рис. 2. Зависимость количества (N_1 и N_2) сигналов АЭ соответственно с амплитудами A_1 и A_2 и отношения N_1/N_2 образцов мрамора типа I по ГОСТ 29167 при трехточечном изгибе от интенсивности нагружения:

- 1 – амплитуда сигнала АЭ $A_1 = 0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2 > 0,5$ В;
3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ

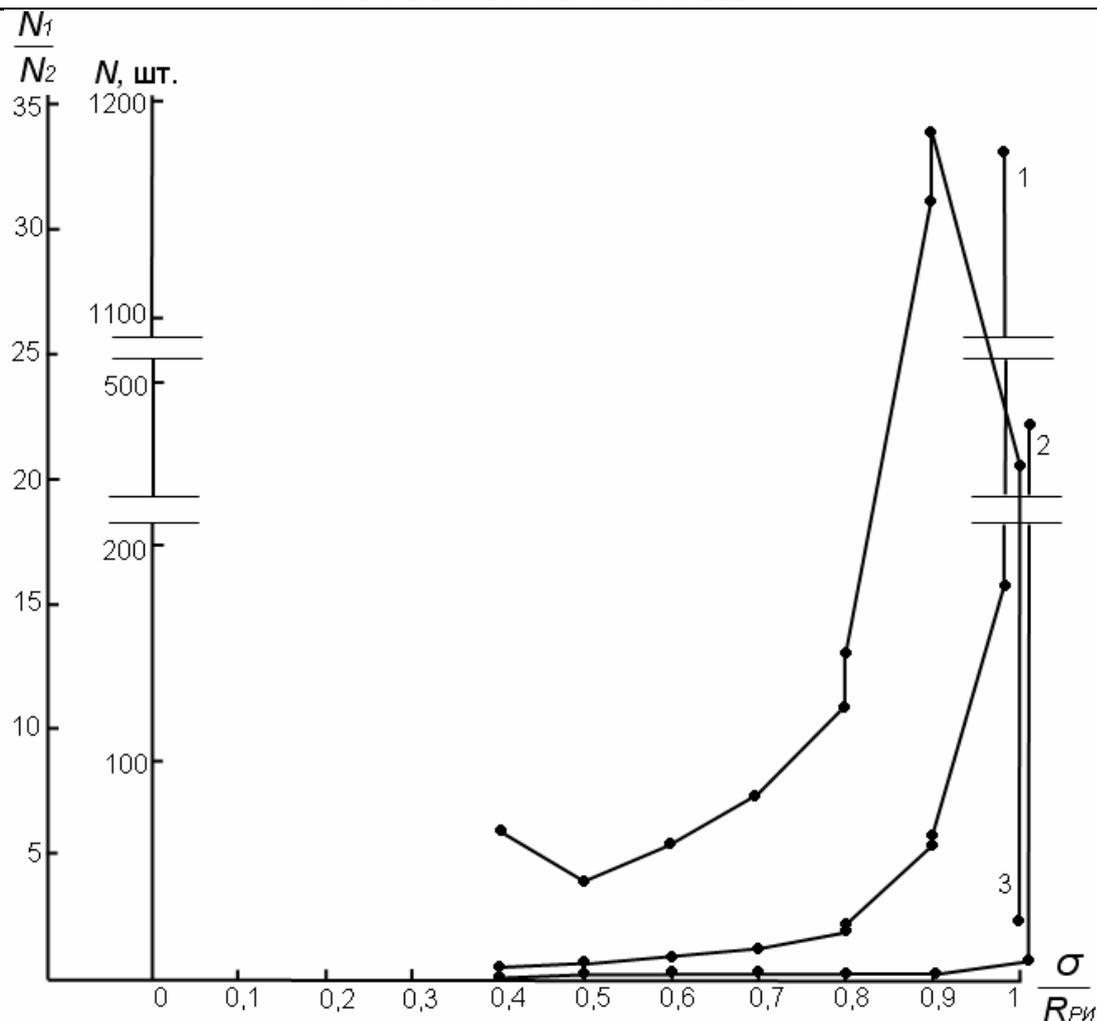


Рис. 3. Зависимость количества (N_1 и N_2) сигналов АЭ соответственно с амплитудами A_1 и A_2 и отношения N_1/N_2 образцов известняка типа I по ГОСТ 29167 при трехточечном изгибе от интенсивности нагружения: 1 – амплитуда сигнала АЭ $A_1 = 0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2 > 0,5$ В; 3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ

Сравнивая зависимости изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ от интенсивности нагружения образцов каменных материалов (см. рис. 1-4), отличающихся не только генезисом, но и плотностью, прочностью, модулем упругости, коэффициентом внутреннего трения и энергией разрушения [3], следует отметить как качественное, так и количественное различие анализируемых зависимостей, что отражает влияние совокупности названных факторов на механизм разрушения дисперсно-кристаллитной структуры этих горных пород под нагрузкой.

Для более эффективного анализа зависимостей изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ горных пород от интенсивности нагружения, более глубокого понимания процесса разрушения и выявления параметров материала, определяющих его трещиностойкость, целесообразно проводить этот анализ с учетом основных физико-механических свойств горных пород, приведенных в таблице и полученных нами экспериментальным путем, причём их значения не противоречат данным других исследователей [5].

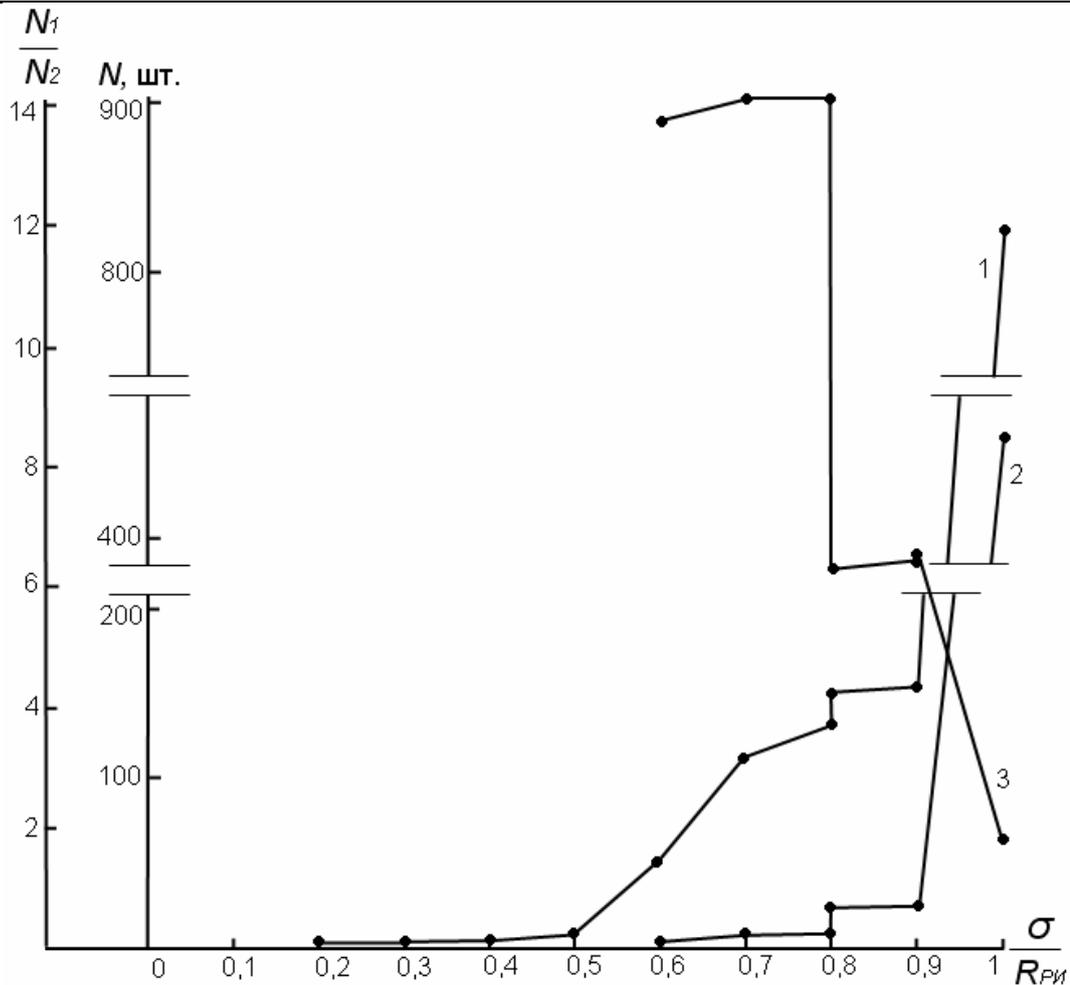


Рис. 4. Зависимость количества (N_1 и N_2) сигналов АЭ соответственно с амплитудами A_1 и A_2 и отношения N_1/N_2 образцов арктического туфа типа I по ГОСТ 29167 при трехточечном изгибе от интенсивности нагружения: 1 – амплитуда сигнала АЭ $A_1 = 0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2 > 0,5$ В; 3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ

Т а б л и ц а

Параметры	Горные породы			
	гранит	мрамор	известняк	туф
Плотность, г/см ³	2,78	2,73	2,44	1,17
Прочность $R_{рп}$, МПа	15,57	23,47	8,11	6,52
Динамический модуль упругости, МПа	40840	89780	34120	11830
Коэффициент внутреннего трения	0,01224	0,00192	0,00519	0,00320
Предельная деформативность растянутой зоны, мм/м	0,36	0,30	1,07	0,31
Условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	1,270	1,684	0,785	0,614
Энергия разрушения при предельной деформативности, Дж/м ²	296	281	753	162

Акустический параметр $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ можно использовать для идентификации разрушения образцов сравниваемых пород на диаграмме нагружения с учетом различных физических явлений, лежащих в основе генерируемых сигналов АЭ с амплитудами A_1 и A_2 и отражающих в общем случае вклад пластической и упругой (хрупкой) составляющих в суммарный процесс силового разрушения.

Особенность графических зависимостей (см. рис. 1), полученных на образцах гранита, полнокристаллическая мелкозернистая структура которых является типичной композитной структурой, заключается в том, что акустический параметр $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ наглядно отражает колебания этого отношения и стохастический характер амплитудного распределения УЗ-импульсов АЭ на кривой нагружения. При этом заслуживает внимания стохастический характер изменения акустического параметра $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ и достаточно заметное его изменение на отдельных этапах нагружения до полного прекращения излучения сигналов АЭ с амплитудами A_1 и A_2 , что, естественно, находит отражение как в характере наклона кривых, так и в кинетике излучения генерируемых УЗ-импульсов АЭ с названными амплитудами на кривой нагружения. Стохастичность АЭ на кривой нагружения обусловлена неравновесными фазовыми переходами в композитной структуре материала, которые, с позиций синергетики, позволяют обосновать как наличие дискретных уровней энергии на единицу длины развития дефекта структуры, так и смену микромеханизма разрушения в точке бифуркации, при достижении которой скачкообразно изменяются свойства, обусловленные самоорганизацией процесса [6].

На рис. 2 представлены графические зависимости измерения генерируемых УЗ-импульсов АЭ для образцов из плотных белых разновидностей облицовочного уральского мрамора, отличающегося плотной весьма однородной микрокристаллической структурой.

Совместный анализ графических зависимостей (см. рис. 1 и 2) с учетом совокупности физико-механических характеристик сравниваемых горных пород, приведенных в таблице, позволяет прежде всего констатировать существенное различие механических свойств гранита и мрамора. Так, численные значения прочности при изгибе, динамического модуля упругости и условного критического коэффициента интенсивности напряжений образцов мрамора превышали значения механических характеристик образцов гранита, соответственно, в 1,5; 2,2 и 1,3 раза. При этом значения коэффициента внутреннего трения, являющегося мерой внутреннего трения структуры реальных материалов, были, напротив, в 6,38 раза выше у образцов гранита. С точки зрения механического поведения материала под динамической нагрузкой, это значит, что гранит обладает лучшей способностью необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную ему в процессе деформирования. Другими словами, доля плотности энергии микропластических деформаций в зоне образующейся новой поверхности в общей эффективной поверхностной энергии материала значительно выше у образцов гранита, чем у образцов мрамора.

Именно эти свойства и особенности микроструктуры сравниваемых материалов обуславливают принципиальное различие графических зависимостей изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ на диаграмме нагружения опытных образцов гранита и мрамора, заключающееся прежде всего в том, что первые сигналы АЭ с амплитудой до 0,5 В были зарегистрированы на образцах гранита при интенсивности нагружения $0,067 \cdot R_{pu}$, а на образцах мрамора – $0,66 \cdot R_{pu}$. В свою очередь, первые сигналы АЭ с амплитудой более 0,5 В были зарегистрированы, соответственно, при уровне нагружения 0,267 и $0,89 \cdot R_{pu}$. При этом и характер графических зависимостей изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ на рис. 1 и 2 имеет принципиальное отличие, что обусловлено различием как механического поведения, так и микромеханизмов процессов разрушения каменных материалов разного генезиса. В этом случае значение акустического параметра $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ очень четко отражает идентификацию процесса разрушения образцов с учетом различных физических явлений, лежащих в основе генерируемых сигналов с амплитудами A_1 и A_2 , что приближает исследователя к

пониманию процесса разрушения и выявлению параметров материала, определяющих его трещиностойкость. Следует отметить, что характер изменения и численные значения акустического параметра на кривой нагружения образцов являются в этом смысле определяющими, так как на его основе можно прогнозировать предельные состояния структуры материала и его вязкость разрушения при силовом воздействии. Чем более широкий диапазон интенсивностей нагружения охватывает акустический параметр и чем больше его численное значение, тем больше он отражает вклад пластической составляющей в суммарный процесс разрушения и наоборот (см. рис. 1 и 2). В свою очередь, достаточно резкое уменьшение численного значения акустического параметра, отражающего скачкообразную смену микромеханизма разрушения, является предвестником наступления предельного состояния структуры материала.

На рис. 3 и 4 приведены графические зависимости изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ от интенсивности нагружения образцов известняка и арктического туфа.

Сравнивая графические зависимости рис. 2 и 3, полученные на образцах из карбонатной породы – мрамора и известняка, следует прежде всего отметить, что плотность мрамора составляла 2,73, а известняка – 2,44 г/см³. При этом, как следует из таблицы, значения прочности, динамического модуля упругости и условного критического коэффициента интенсивности напряжения у образцов мрамора значительно превосходили эти показатели у образцов известняка. Однако численные значения предельной деформативности растянутой зоны, энергии разрушения при предельной деформативности и коэффициента внутреннего трения, напротив, были, в свою очередь, заметно выше у образцов известняка, чем у образцов мрамора. Это различие физико-механических свойств мрамора и известняка обусловлено как пористостью, так и микроструктурой карбонатной породы. У мрамора она была очень однородной и микрокристаллической, а известняк имел заметно крупнокристаллическую структуру. Вместе с тем различие структурно-механических параметров образцов мрамора и известняка обуславливает существенное отличие графических зависимостей генерации УЗ-импульсов АЭ от интенсивности нагружения.

Отличительная особенность графических зависимостей образцов известняка (рис. 3) в сравнении с образцами мрамора (рис. 2) заключается в том, что с учетом пониженного значения модуля упругости, повышенного значения предельной деформативности и коэффициента внутреннего трения первые УЗ-импульсы АЭ с амплитудой A_1 и A_2 на диаграмме нагружения образцов известняка были зарегистрированы на уровне нагружения $0,4 \cdot R_{pu}$. Дальнейшее повышение интенсивности нагружения вплоть до уровня $0,9 \cdot R_{pu}$ сопровождалось практически только приростом количества сигналов АЭ с амплитудой A_1 , что приводило к аномальному росту акустического параметра $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ до численного значения 34, тогда как для образцов мрамора при аналогичном уровне интенсивности нагружения, т.е. $0,9 \cdot R_{pu}$, он был равен 10.

Выше было отмечено, что численные значения акустического параметра на кривой нагружения отражают относительный вклад пластической и упругой (хрупкой) составляющих в общий процесс деформирования и разрушения материала при нагружении. В этой связи можно констатировать, что по характеру изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ и акустического параметра $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ от интенсивности нагружения карбонатная порода известняка характеризовалась большей вязкостью (трещиностойкостью) разрушения, чем карбонатная порода мрамора, что согласуется с численными значениями энергии разрушения этих пород в Дж/м², приведенными в таблице.

Из анализа графических зависимостей (рис. 4), полученных на образцах арктического туфа, следует отметить, что по характеру изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ на кривой нагружения туф практически ничем не отличается от рассматриваемых зависимостей других пород. В качестве отличительной особенности можно отметить меньшее количество УЗ-импульсов АЭ на кривой нагружения, что обусловлено пористостью структуры и меньшей плотностью туфа, равной 1,17 г/см³, а следовательно, и меньшей потенциальной энергией при деформировании опытного образца.

Таким образом, проведенные комплексные исследования физико-механических свойств и изменения генерируемых УЗ-импульсов АЭ на диаграмме нагружения опытных образцов типа I горных пород разного генезиса, испытанных по методике ГОСТ 29167 с использованием метода АЭ для изучения самого процесса разрушения, позволяют сформулировать следующие выводы:

– предложен и реализован научно обоснованный методологический подход к комплексной оценке механического поведения при силовом воздействии и конструкционного выбора природных каменных материалов для бетонов нового поколения;

– предложена действенная программа оценки конструкционной прочности как комплексной характеристики, включающей сочетание критериев прочности, надежности и долговечности горных пород, позволяющая, с одной стороны, более обоснованно подходить к выбору крупного заполнителя для получения бетонов конструкционного назначения с повышенной трещиностойкостью, а с другой – проводить анализ полученных зависимостей с позиций системно-структурного подхода;

– выявлен характер изменения амплитудно-энергетического распределения УЗ-импульсов АЭ и соотношения $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ на кривой нагружения как акустических параметров, отражающих развитие деформирования и разрушения материала на разных масштабных уровнях, в основе которых лежат различные физические явления, и являющихся прогностическими параметрами состояния структуры материала при силовом воздействии;

– результаты исследований могут быть положены в основу получения новых физически обоснованных параметров механического поведения и классификации каменных пород по трещиностойкости в целях реализации основной идеи разработки композиционных строительных материалов, заключающейся в соединении высокой прочности с хорошей вязкостью разрушения и повышением качества бетонов.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2007. – 524 с.
2. Ленг, Ф.Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице / Ф.Ф. Ленг // Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость: пер. с англ. под ред. Г.П. Черепанова. – М.: Мир, 197. – С. 9–57.
3. Макридин, Н.И. Комплексная оценка механического поведения заполнителей бетона из горных пород / Н.И. Макридин, Ю.П. Скачков, И.Н. Максимова, И.А. Суров // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №3(14). – С. 18–25.
4. Макридин, Н.И. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова // Строительные материалы. 2007. – №3; Наука. – №9. – С. 25–27.
5. Беликов, Б.П. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород / Б.П. Беликов, К.С. Александров, Т.В. Рыжова. – М.: Наука. 1970. – 269 с.
6. Данилов, Ю.А. Что такое синергетика? / Ю.А. Данилов, Б.Б. Кадомцев // Нелинейные волны, самоорганизация: сб. – М.: Наука. 1983. – С. 5–16.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Technology of concrete / Yu.M. Bazhenov. – M.: ASV, 2007. – 524 p.
2. Leng, F.F. Destruction of composites with dispersed particles in brittle matrix / F.F. Leng // Composite materials. T. 5. Destruction and fatigue: trans. with the engl. edited by G.P. Cherepanova. – M.: Peace, 1978. – P. 9–57.
3. Makridin, N.I. The integrated assessment of mechanical behavior of the fillers of rocks concrete / N.I. Makridin, Yu.P. Skachkov, I.N. Maksimova, I.A. Surov // Regional architecture and building. – 2012. – №3 (14). – P. 18–25.
4. Makridin, N.I. Method of acoustic emission in construction materials science / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maximova // Building materials. – 2007. – №3; Science. – №9. – P. 25–27.
5. Belikov, B.P. Elastic properties of rock-forming minerals and of the rocks / B.P. Belikov, K.S. Alexandrjv, T.V. Ryzhova. – M.: Science, 1970. – 269 p.
6. Danilov, Yu.A. What is synergetic? / Yu.A. Danilov, B.B. Kadomtsev // Nonlinear waves, self-organizing: collection. – M.: Science, 1983. – P. 5–16.

УДК 691.342

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

Круглова Альбина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: albinakruglova@yandex.ru

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел.: (8342)47-77-11; факс: (8342)47-77-51

Селяев Владимир Павлович,
президент Научно-технического общества
строителей Республики Мордовия,
академик РААСН, доктор технических
наук, профессор, зав. кафедрой
«Строительные конструкции»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction

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

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

Kruglova Al'bina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: albinakruglova@yandex.ru

Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Russia, 430006, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

Seljaev Vladimir Pavlovich,
President of Scientific and Technical Society
of the Mordovia Republic, Academician of the
Russian Academy of Architectural and Construction
Sciences, Doctor of Sciences, Professor, Head
of the department «Building designs»
E-mail: ntorm80@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АППРЕТИРОВАНИЯ

А.М. Данилов, А.Н. Круглова, В.П. Селяев

Приводятся результаты экспериментальных исследований свойств эпоксидных композиционных материалов на основе аппретированных наполнителей. Для управления качеством материалов предлагаются модели их соответствующих характеристик.

Ключевые слова: эпоксидные композиционные материалы, аппретирование наполнителей, модели свойств, управление качеством.

QUALITY CONTROL OF EPOXY COMPOSITES USING COATED FILLERS

A.M. Danilov, A.N. Kruglova, V.P. Seljaev

The results of experimental studies of the properties of epoxy composites based on coated fillers are considered. To control the quality of materials models of their characteristics are offered.

Keywords: epoxy composites, fillers, dressing, property models, control quality.

Среди материалов для защиты от ионизирующих излучений, применяемых на объектах атомной энергетики, пока получили широкое распространение цементные бетоны на тяжёлых наполнителях. К сожалению, им присущи высокая проницаемость и недостаточная стойкость при воздействии агрессивных сред, а также недостаточная трещиностойкость. Тем не менее определенного улучшения защитных свойств материала можно достичь даже при одновременном решении экологических задач

(инкапсуляция высокоплотных отходов производства с высоким содержанием соединений свинца в радиационно-защитных ЭКМ). Ограничимся модификацией межфазной границы «полимер – наполнитель» (*аппретирование наполнителя*) материалов на основе связующих, наполненных отходами производства оптического стекла (ОПОС); в качестве аппрета применялся *полиметилфенилсилоксан*; области изменения используемых управляющих факторов приводятся в таблице.

Входные переменные для эпоксидных композитов,
наполненных аппретированным ОПОС

№ серии	Объемная степень наполнения x_1	Толщина слоя аппрета, нм, x_2
1	0,527	6,40
2	0,173	6,40
3	0,527	1,10
4	0,173	1,10
5	0,350	7,50
6	0,350	0,00
7	0,600	3,75
8	0,100	3,75
9	0,475	3,75
10	0,225	3,75

Для прогноза свойств и управления качеством материалов использовалась модель *предела прочности* (МПа) *при сжатии*, полученная методами планирования эксперимента:

$$R_p = 163 + 32,9x_1 - 16,7x_2 - 1,17x_1^2 - 6,17x_2^2 + 8,88x_1x_2 - 0,86x_1x_2^2 - 12x_1^3 - 7,87x_2^3,$$

где x_1, x_2 – значения объемной степени наполнения в долях от объема композиции и толщины слоя аппрета соответственно (линии равной прочности при сжатии – на рис. 1). Прочность эпоксидного композита определяется свойствами его компонентов и интенсивностью физико-химического взаимодействия на межфазной границе. Для всех составов, рекомендованных по результатам исследования, экстремальные значения предела прочности при сжатии достигаются внутри области изменения факторов. Область наиболее интенсивных структурных трансформаций определяется неравенствами $0,1 < v_f < 0,2$ и $0,4 < v_f < 0,6$. При увеличении объемной степени наполнения образуется жёсткий каркас из частиц наполнителя, связанных прослойками плёночной фазы матрицы (прочностные показатели достигают максимума). Формирование на частицах наполнителя слоя аппрета толщиной 2,5 нм сопровождается ростом прочности до 11 % (см. рис. 1).

При малой дисперсности наполнителя аппретирование поверхности устраняет недостаток наполнителя.

Линии равной прочности для модели *предела прочности при изгибе*

$$R_b = 38,8 - 0,75x_1 + 0,335x_2 + 0,85x_1x_2 - 1,53x_1^2 - 0,9x_2^2 + 0,178x_1^2x_2 + \\ + 0,034x_1x_2^2 - 0,34x_1^3 - 0,157x_2^3$$

приводятся на рис. 2. Максимальное значение – у состава с меньшей объемной степенью наполнения по сравнению со значением, при котором достигается предел прочности при сжатии. При аппретировании предел прочности при изгибе возрастает до 15 %. При избытке наполнителя градиент предела прочности практически ортогонален оси концентраций; основные показатели определяются в основном объемной степенью наполнения.

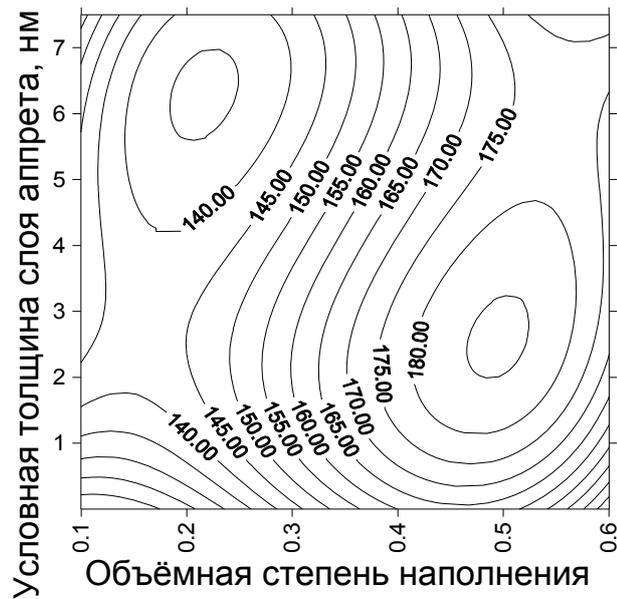


Рис. 1. Линии равной прочности при сжатии

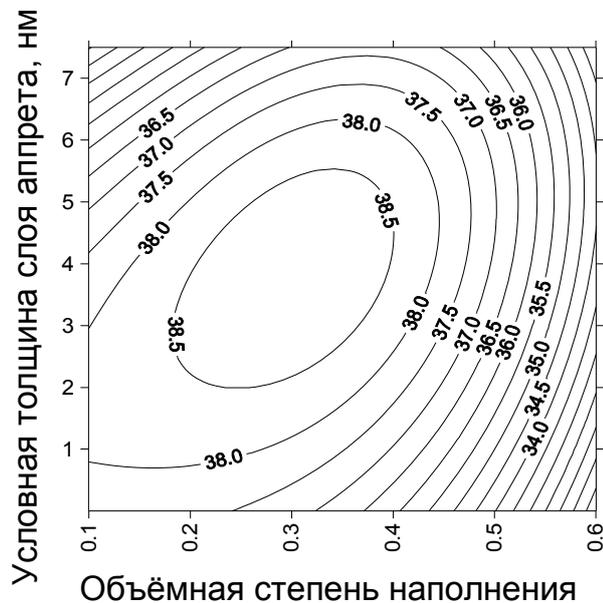


Рис. 2. Линии равной прочности при изгибе

Линии уровня для модуля деформации (ГПа)

$$E_p = 4,43 + 2,02x_1 - 0,1x_2 + 0,58x_1^2 - 0,22x_1^3$$

приводятся на рис. 3. Отметим, что при выбранном значении модуля деформации условная толщина слоя аппрета практически линейно зависит от объемной степени наполнения (для разных значений модуля практически эквидистантны).

Была исследована *относительная деформация при разрушении* материалов. Расчетные значения определялись по модели:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 3,67 - 1,77x_1 - 0,335x_1 - 0,275x_1x_2 + 0,267x_1^2 - 0,108x_2^2 + \\ & + 0,178x_1^2x_2 + 0,251x_1x_2^2 + 0,141x_1^3 + 0,157x_2^3 \end{aligned}$$

(линии уровня – на рис. 4).

Увеличение степени наполнения от 0,1 до 0,3 сопровождается некоторым ростом модуля деформации. Это легко объясняется образованием в полимере шитой структуры в результате перекрытия граничных слоев, принадлежащих различным частицам наполнителя (не позволяет макромолекулярным цепям достичь сегментальной подвижности кооперативного типа).

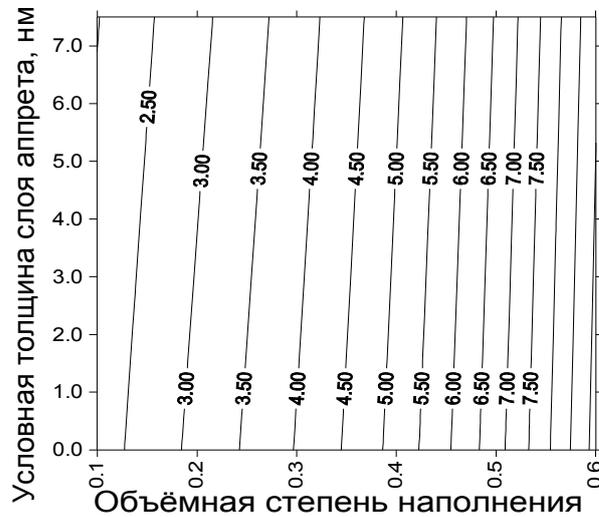


Рис. 3. Линии уровня для модуля деформации (ГПа)

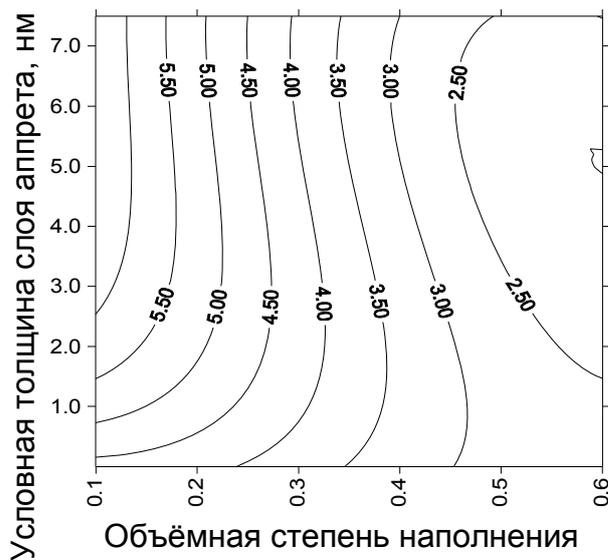


Рис. 4. Линии равной относительной деформации (%)

Аппретирование не вызывает существенного *изменения деформативных характеристик* наполненного эпоксидного связующего. Образование жесткого каркаса из частиц наполнителя сопровождается значительным ростом модуля деформации. Интенсивное снижение деформативности наблюдается лишь для высоконаполненных составов. Это можно объяснить возникновением в объеме ЭС жесткого перколяционного каркаса из частиц наполнителя (связаны прослойками пленочной фазы матрицы). Аппретирование не оказывает влияния на модуль деформации ЭС и при одинаковых малых значениях объемной степени наполнения. Увеличение аппрета приводит к его адсорбции на поверхности наполнителя не в виде регулярно ориентированных мономолекулярных слоев, а в виде многослойных пленок. Поэтому для высоконаполненных ЭС наблюдается незначительный рост деформативности.

Исследовалось влияние рецептурно-технологических факторов ЭКМ на стойкость к воздействию агрессивных сред (с позиций синергетики: тепловая обработка, введение активных химически стойких наполнителей, блокировка аппретами силанольных

групп на поверхности наполнителя). Не обошли и вопрос антагонистического влияния: введение инертных и/или гидрофильных наполнителей, грубодисперсных фаз, растворителей, структурных пластификаторов. Стойкость ЭКМ определяется густотой пространственной сетки отверждённого эпоксидного полимера и степенью его кристалличности. Возрастание полноты отверждения эпоксидной смолы сопровождается увеличением количества межмолекулярных связей пространственной сетки, что способствует получению стойких материалов. Густая сшивка обеспечивает получение композита с повышенной теплостойкостью, твердостью и прочностью при сжатии. К сожалению, наблюдается охрупчивание материала, что приводит к снижению сопротивления ударным нагрузкам, прочности при изгибе и разрыве. Технологические решения, естественно, определяются целевой областью применения материала и принимаются на основе компромиссов (относится к разработке и радиационно-защитных, и химически стойких ЭКМ).

Увеличение густоты пространственной сетки достигается при соответствующем выборе модифицирующих добавок и использовании особых технологических мероприятий, в частности *тепловой обработки*. Введение пластификаторов уменьшает охрупчивание, однако одновременно снижаются стойкость и прочностные показатели. Переход матрицы из состояния массива в состояние тонких пленок (на поверхности раздела с наполнителем) способствует получению материала с пониженной проницаемостью и повышенной стойкостью к воздействию агрессивных сред. Поэтому многие аппреты (в частности полиметилфенилсилоксан (ПМФС)) и эффективны в сочетании с гидрофильными кварцсодержащими наполнителями. Нанесение слоя ПМФС блокирует силанольные группы на поверхности частиц наполнителя и способствует получению материала с пониженным водопоглощением, повышенной водо- и химической стойкостью, стойкостью к воздействию атмосферных факторов.

Эффект от введения в полимер тонкодисперсных минеральных наполнителей неоднозначен. Развитая поверхность тонкодисперсного наполнителя соответствует большей площади границы раздела. Состояние границы имеет решающее значение: именно на границе раздела фаз сосредоточено наибольшее количество структурных дефектов композиционных материалов.

Известно, что при содержании дисперсных фаз выше некоторого предельного уровня процесс разрушения эпоксидных композиционных материалов ускоряется; снижается стойкость к воздействию агрессивных факторов (можно повысить введением некоторых наполнителей в сочетании с модификаторами).

Для 10 серий образцов наполненного эпоксидного связующего исследовалось *водопоглощение*. Каждый из образцов экспонировался в течение 360 сут. Массы образцов измерялись через 1, 7, 21, 62 и 360 сут. По результатам эксперимента было получено 20 соответствующих нелинейных моделей водопоглощения вида:

$$\delta M = \delta M_{\infty} \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{T_{1/2} \ln 2} \right) \right), \quad (1)$$

где δM_{∞} – расчетное асимптотическое водопоглощение (для материалов с открытой пористостью отражает интегральную пористость).

Водопоглощение зависит от распределения пор (по радиусам) и обуславливается низкой активностью воды как агрессивного флюида (не приводит к существенной деградации материала в течение срока экспозиции). В модели приняты обозначения: $T_{1/2}$ – расчетное *время половинного насыщения* (время, за которое масса образца возрастает на $\delta M_{\infty} / 2$; для исследуемых материалов – 30...120 сут).

ЭС-модель асимптотического водопоглощения (%) для связующего на основе ОПОС имеет вид:

$$W_a = 0,38 + 0,14x_1 - 0,2x_1x_2 + 0,1x_1^2 + 0,03x_2^2 - 0,16x_1^2x_2 + 0,11x_1x_2^2, \quad (2)$$

где x_1 – объемная степень наполнения; x_2 – толщина слоя ПМФС (линии равного уровня – на рис. 5).

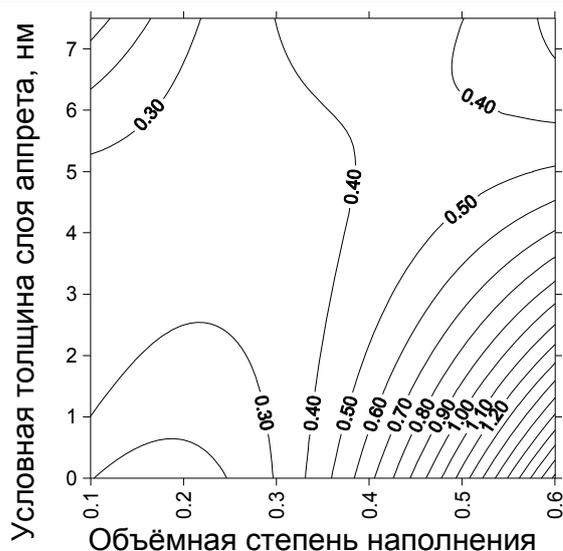


Рис. 5. Водопоглощение ЭС, наполненного ОПОС

При аппретировании происходит блокировка силанольных групп на поверхности частиц наполнителя, что приводит к пониженному водопоглощению материала (нанесение слоя аппрета толщиной 2,5 нм снижает водопоглощение после года экспозиции на 24 % по сравнению с контрольными образцами, без аппрета). Среднее значение водопоглощения для всей исследованной области

$$\langle \delta M \rangle = \frac{1}{4} \int_{-1}^1 dv_f \int_{-1}^1 \delta M_{\infty, -1}(v_f, c_a) dc_a \approx 0,63. \quad (4)$$

Введение ПМФС в эпоксидное связующее на ОПОС позволяет не только уменьшить абсолютное значение водопоглощения, но и снизить его дисперсию. Оказалось, что составы с максимальной объемной степенью наполнения нельзя применять в конструкциях, подвергающихся воздействию влаги (при насыщении лишь поверхностных слоев образца наблюдаются сравнительно невысокие значения расчетного асимптотического водопоглощения).

Вода в наибольшей степени оказывает влияние на процессы деструкции полярных полимеров и в меньшей степени – на деструкцию высокомолекулярных полимеров. При проникновении влаги в материал увеличиваются напряжения в вершинах микротрещин. Процесс деструкции определяется также интенсивностью химического взаимодействия полимера и среды, наличием и интенсивностью растворения полимера, поверхностно-адсорбционными эффектами, скоростью проникновения к перенапряженным участкам. Эксплуатационные свойства (коэффициент диффузии и стойкость к воздействию агрессивной среды и др.) композитов существенно ухудшаются, если в материале присутствуют закапсулированные агрегаты из несмоченных частиц наполнителя и/или сухие контакты между зернами наполнителя (количество таких агрегатов быстро возрастает после достижения некоторого предельного значения объемной степени наполнения). Под действием воды в КМ изменяются свойства как полимерной матрицы, так и дисперсных фаз. Её проникновение по микротрещинам и поверхности наполнителя уменьшает адгезию дисперсной фазы к матрице. К появлению трещин приводит и набухание связующего (с возникновением значительных напряжений). Сравнительно высокую стойкость эпоксидных смол и материалов на их основе к воздействию воды можно получить с использованием способности эпоксидной матрицы к локализации и агрегированию воды у активных групп и инородных включений.

Водостойкость исследовалась для десяти серий ЭС по два набора в серии: один из наборов являлся контрольным, образцы второго подвергались выдержке в воде в течение 360 сут (при температуре выдержки, совпадающей с температурой атмосфер-

ного воздуха). После завершения выдержки образцы испытывались на осевое сжатие; определялся коэффициент водостойкости: $K = \frac{R}{R_0}$ (R – предел прочности при сжатии образца, выдержанного в воде; R_0 – предел прочности при сжатии соответствующего образца контрольной серии). Для прогноза использовалась модель коэффициента водостойкости:

$$K = 0,9 - 0,04x_1 + 0,02x_1x_2 - 0,04x_1^2 - 0,03x_2^2 + 0,02x_1^2x_2 - 0,03x_1x_2^2$$

(линии уровня – на рис.6).

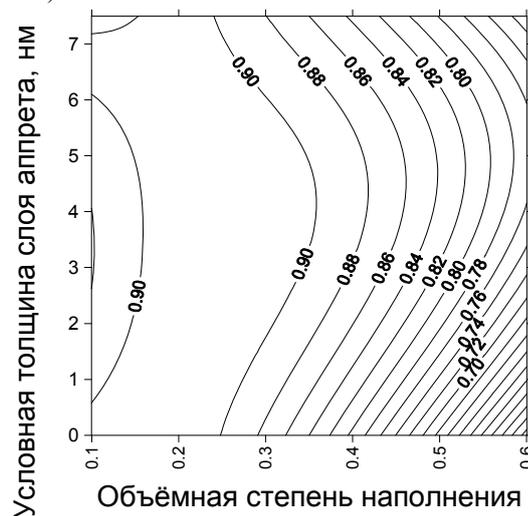


Рис.6. Водостойкость ЭС, наполненного ОПОС

С увеличением объемной доли дисперсной фазы водостойкость не модифицированных ЭС на основе ОПОС снижается нелинейно. Отсутствие аппрета уменьшает водостойкость (объясняется появлением развитой поровой структуры при введении больших количеств ОПОС ($v_f > 0,5$)). Средние значения коэффициента водостойкости для ЭС на основе ОПОС сравнительно малы. Экстремумы водостойкости достигаются вне принятых факторных областей. Наименьшей водостойкостью обладают составы с наибольшей объемной долей дисперсной фазы.

Выводы:

1. Получены результаты экспериментальных исследований прочности при сжатии, изгибе; модуля деформации; относительной деформации; водопоглощения и водостойкости наполненных эпоксидных связующих, аппретированных полиметилфенилсилоксаном.

2. Установлено, что существенное улучшение физико-механических свойств возможно на основе аппретирования наполнителя. Достигается повышение прочности ЭС на 7...12 % при нанесении слоя аппрета толщиной 2,5 нм (прочность при сжатии – до 192 МПа; изгибе – до 53 МПа).

Список литературы

1. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев; Минобрнауки РФ, ФГБОУ ВПО МГСУ. – М.: МГСУ, 2012. – 432 с.

References

1. Systems analysis in building materials / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev; Moscow State University of Civil Engineering. – M.: MGSU, 2012. – 432 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Стандартизация,
сертификация и аудит качества»
E-mail: loganin@mai.ru

Акжигитова Эльвира Ринатовна,
аспирант кафедры «Стандартизация,
сертификация и аудит качества»
E-mail: marat999192@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Standardization, certification and
quality audit»
E-mail: loganin@mai.ru

Akzhigitova Elvira Rinatovna,
Postgraduate of the department
«Standardization, certification and quality
auditing»
E-mail: marat999192@mail.ru

ОЦЕНКА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК

В.И. Логанина, Э.Р. Акжигитова

Рассматриваются гидрофизические свойства покрытий на основе сухих строительных смесей (ССС) с применением добавок, получаемых из смешанослойных глин.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, минеральная добавка, органоминеральная добавка, сорбционная способность, водопоглощение, водостойкость, коэффициент размягчения, коэффициент диффузии влаги, пористость.

EVALUATION OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF COATINGS BASED ON DRY BUILDING MIXES WITH MINERAL AND ORGANIC ADDITIVES

V.I. Loganina, E.R. Akzhigitova

Hydrophysical properties of coatings based on dry mixes using additives based on mixed-clay are considered.

Keywords: dry mix, mineral supplement, organic additive, sorption capacity, water absorption, water resistance, softening coefficient, diffusion coefficient of moisture, porosity.

При создании сухих строительных смесей (ССС), используемых для реставрации зданий и сооружений, для регулирования их свойств предлагается введение в рецептуру модифицирующих добавок. Учитывая, что в основном модифицирующие добавки поставляются из-за рубежа, что делает производство СССР зависимым от поставок, нами при разработке СССР предложено применять добавки на основе смешанослойных глин, которые имеют широкое распространение на территории Поволжья.

Проведенные ранее исследования подтвердили возможность применения смешанослойных глин с повышенным содержанием монтмориллонита для изготовления органоминеральных добавок, применяющихся в рецептуре красочных составов [1-4]. Введение органоминеральной добавки в рецептуру известковой СССР позволяет повысить устойчивость к сползанию с вертикальной поверхности отделочного слоя [5, 6].

Кроме того, предлагается минеральная добавка, получаемая обжигом смешанослойных глин при температуре 450–500 °С, что позволяет повысить прочность известково-песчаного композита [7]. Глина, обожженная при температуре 500 °С, проявляет более активное взаимодействие с известью. При рентгенофазовом анализе (РФА) установлено, что в известково-песчаных образцах с применением глины, обожженной при температуре 500 °С, дополнительно идентифицируются линии, относящиеся к гидроалюмосиликатам кальция $\text{Ca}_6\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 28 \text{H}_2\text{O}$ (7,1073 Å; 2,6168 Å; 2,4943 Å; 2,4520 Å).

Отделочное покрытие на основе разработанной сухой смеси представляет собой капиллярно-пористый материал, поглощающий в процессе эксплуатации водяной пар из влажного воздуха. Для оценки гигроскопичных свойств покрытий на основе предлагаемых составов были проведены исследования их сорбционной способности, кинетики водопоглощения, водостойкости. В работе в качестве вяжущего использовалась известь 2-го сорта с активностью 84 %, в качестве заполнителя – пески Ухтинского и Нижне-Аблязовского месторождений. Песок Ухтинского месторождения применялся с соотношением фракций 0,63–0,315 мм и 0,315–0,14 мм соответственно 80 %:20 %, насыпная плотность песка при этом составляла $\rho_{\text{нас}} = 1527 \text{ кг/м}^3$. Гранулометрический состав Нижне-Аблязовского песка состоял из фракций 0,63–0,16 с насыпной плотностью $\rho_{\text{нас}} = 1305 \text{ кг/м}^3$. Рецептуры составов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Составы ССС

№ п/п	Состав	Водо-известковое отношение В/И	Содержание добавки, %				
			минеральная добавка на основе Воробьевской глины	минеральная добавка на основе Белинской глины	органо-минеральная добавка на основе Камешкирской глины	С-3	Neolith 7200
1	Известь:Ухтинский песок = 1:4	1,4	-	-	-	-	-
2	Известь: Ухтинский песок = 1:4	1,07	10	-	1	1	1
3	Известь: Нижне-Аблязовский песок = 1:4	1,75	-	-	-	-	-
4	Известь: Нижне-Аблязовский песок = 1:4	1,27	-	10	1	2	1

При изучении кинетики сорбции влаги образцы, предварительно высушенные в сушильном шкафу при температуре $t=105...110 \text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы, были помещены в эксикаторы с различной относительной влажностью воздуха $\varphi = 20...97 \%$ и постоянной температурой $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

На основании полученных данных были построены изотермы сорбции $W = f(\varphi)$ (рис.1, 2).

Результаты экспериментальных данных показали, что с увеличением относительной влажности воздуха закономерно возрастает сорбционная влажность, при этом процесс насыщения образцов влагой описывается S-образными изотермами сорбции, характерными для капиллярно-пористых материалов, хорошо смачиваемых водой. Сорбция влаги в интервале значений относительной влажности воздуха до 20 % подчиняется закону Генри в соответствии с формулой (1), т.е. зависимость сорбционного увлажнения от относительной влажности воздуха близка к линейной:

$$W = k(\varphi). \quad (1)$$

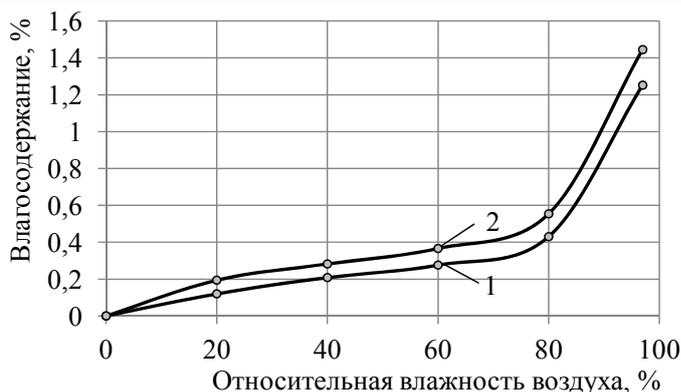


Рис.1. Сорбционная способность известково-песчаных составов с использованием Ухтинского песка:
1 – покрытия на основе 1-го состава; 2 – покрытия на основе 2-го состава

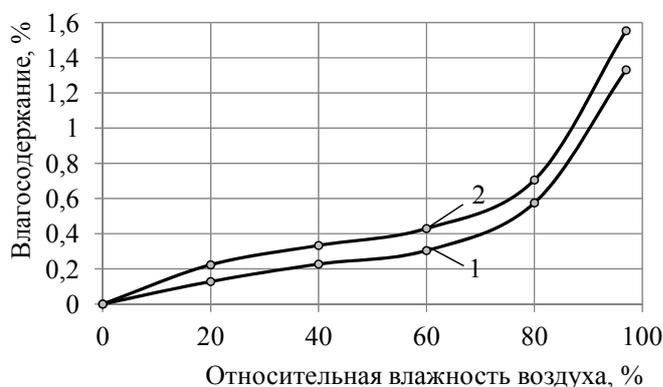


Рис.2. Сорбционная способность известково-песчаных составов с использованием Нижне-Аблязовского песка:
1 – покрытия на основе 3-го состава; 2 – покрытия на основе 4-го состава

При повышении относительной влажности воздуха до 40 % влагосодержание в образцах увеличивается в соответствии с уравнением Фрейндлиха [8]. Выпуклая часть изотерм ($\varphi = 20 \dots 40$ %) указывает на присутствие внутри исследуемых образцов только адсорбированной влаги, состоящей из одного слоя молекул водяного пара. Повышение относительной влажности воздуха до 70 % приводит к образованию на внутренней поверхности материала пленок адсорбированной влаги, состоящих из многих слоев молекул. Начиная с 70 %-й влажности происходит резкое возрастание сорбционного увлажнения, что свидетельствует о протекании процесса капиллярной конденсации [9].

Результаты испытаний показали, что наименьшей сорбцией обладают покрытие на основе 1-го состава (рис.1, кривая 1) и покрытие на основе 3-го состава (рис.2, кривая 1). При относительной влажности воздуха $\varphi = 97$ % сорбционное увлажнение составляет соответственно 1,25 % и 1,33 %.

При введении в рецептуру ССС модифицирующих добавок, в том числе минеральных и органоминеральных, влагосодержание при относительной влажности $\varphi = 97$ % возрастает до 1,44 % (покрытие на основе 2-го состава) и до 1,55 % (покрытие на основе 4-го состава). Очевидно, повышение сорбционной емкости обусловлено, как отмечалось выше, образованием цеолитов в структуре покрытия, характеризующихся высокопористой поверхностью [10].

При оценке кинетики водопоглощения установлено, что наиболее интенсивное водопоглощение наблюдалось в течение первых двух часов (рис. 3, 4). В первый момент увлажнения (3 ч) зависимость влагосодержания от времени увлажнения описывается квадратичной параболой по формуле

$$W = f(\sqrt{\tau}). \quad (2)$$

Водопоглощение образцов покрытия на основе 1-го состава (рис.3, кривая 1) после 4 ч водонасыщения составило 13,13 %, а при введении в его рецептуру минеральных и органоминеральных добавок – 11,97 % (см. рис.3, кривая 2). После 4 ч водонасыщения наблюдается стабилизация значений водопоглощения. После 24 ч водонасыщения водопоглощение контрольных образцов составило 13,62 % , образцов с введением добавок – 12,29 % (см. рис.3).

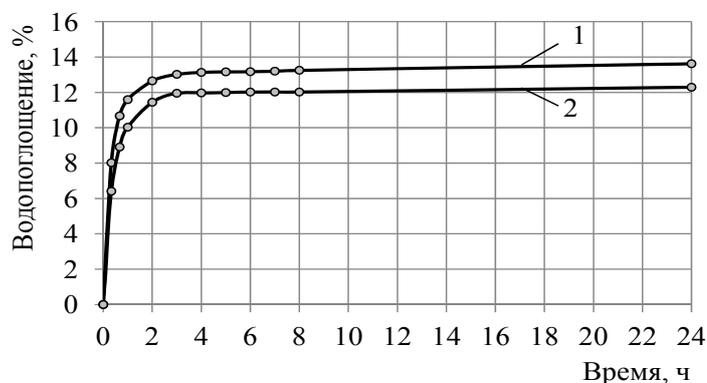


Рис.3. Кинетика водопоглощения по массе известково-песчаных образцов с использованием Ухтинского песка:

1 – покрытия на основе 1-го состава; 2 – покрытия на основе 2-го состава

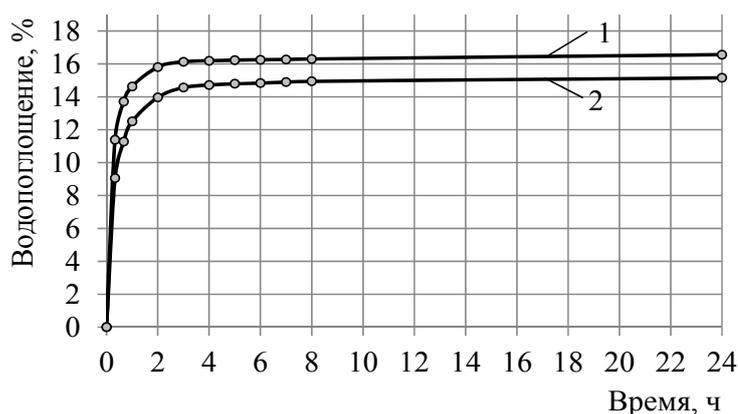


Рис.4. Кинетика водопоглощения по массе известково-песчаных образцов с использованием Нижне-Аблязовского песка:

1 – покрытия на основе 3-го состава; 2 – покрытия на основе 4-го состава

Аналогичные закономерности наблюдаются у покрытий на основе составов ССС с применением Нижне-Аблязовского песка (см. рис.4). Более высокая скорость водонасыщения, характерная для покрытий на основе составов ССС без модифицирующих добавок (1-го и 3-го составов), определяется более пористой их структурой, имеющей и более высокое значение коэффициента диффузии влаги (табл.2). При определении коэффициента диффузии влаги применялся экспресс-метод, заключающийся в определении изменения влагосодержания образцов при значениях времени экспозиции, одно из которых вдвое больше другого [11]. Значения коэффициента диффузии влаги составляют соответственно $D = 2,34 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и $3,36 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Введение в рецептуру разработанных ССС минеральных, органоминеральных и полимерных добавок наряду со снижением пористости на 14,5 % и 17,8 % способствует снижению водопоглощения на 11 % у составов с применением Ухтинского песка и на 9 % у составов на основе песка Нижне-Аблязовского месторождения, что обусловлено уплотнением структуры композита.

Показатели пористости и гидрофизических свойств покрытий на основе ССС

№ п/п	Состав	Пористость, %			Водопоглощение, W_m , %	Значение коэффициента диффузии влаги, $D \cdot 10^{-9}$, м ² /с
		П _{закр}	П _{откр}	П _{общ}		
1	Покрытие на основе 1-го состава	12,00	24,20	36,40	13,62	2,34
2	Покрытие на основе 2-го состава	8,93	22,86	31,79	12,29	1,99
3	Покрытие на основе 3-го состава	14,6	27,9	42,5	16,56	3,36
4	Покрытие на основе 4-го состава	9,87	26,2	36,07	15,16	2,97

Установлено, что коэффициент размягчения покрытий на основе разработанных ССС составляет 0,48–0,52. Разработанные составы ССС рекомендуется применять для внутренних отделочных работ, так как они хорошо наносятся на отделяемую поверхность штукатурки, бетона. Водоудерживающая способность отделочного состава, готового к применению, составляет 97–98 %, жизнеспособность – 2...2,5 ч. При применении Нижне-Аблязовского песка в рецептуре ССС покрытие имеет матовый терракотовый цвет, ровную поверхность, а при применении Ухтинского песка – бежевый цвет с рельефной фактурой. Прочность сцепления покрытия с подложкой составляет не менее 0,6 МПа.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Модификация рецептуры полистирольного красочного состава дисперсными частицами органоглины / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №8. – С. 25–27.
2. Логанина, В.И. Полистирольные краски, содержащие органоминеральные добавки / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2008. – №4. – С. 25–30.
3. Логанина, В.И. Органоминеральная добавка для полистирольных красок / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // Строительные материалы. – 2008. – №2. – С. 44–46.
4. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органоминеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Т.Н. Дмитриева, В.Н. Горбунов // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 9. – С. 36–40.
5. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2011. – №3. – С. 8–12.
6. Логанина, В.И. Эффективность применения в сухих строительных смесях органоминеральных добавок на основе смешанослойных глин / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.В. Черячукин, Э.Р. Акжигитова // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №3. – С. 57–59.
7. Логанина, В.И. Сухие строительные смеси с применением местных материалов Пензенского региона / В.И. Логанина, Г.Д. Фадеева, Э.Р. Акжигитова // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 37–41.
8. Лопаткин, А.А. Теоретические основы физической адсорбции / А.А. Лопаткин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 339 с.
9. Гельфман, М.И. Коллоидная химия / М.И. Гельфман, О.В. Ковалевич, В.П. Юстратов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2008. – 336 с.

10. Овчаренко, Г.И. Цеолиты в строительных материалах / Г.И. Овчаренко, В.Л. Свиридов, Л.К. Казанцева. – Новосибирск: Ин-т минералогии и петрографии СО РАН, 2000. – 320 с.
11. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.

References

1. Loganina, V.I. Modification of the composition of the ink formulation of polystyrene particles dispersed organoclay / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // News vuzov.Stroitelstvo. – 2008. – №8. – P. 25–27.
2. Loganina, V.I. Polystyrene paint, organic-content additives. / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // Paints and applications. – 2008. – №4. – P. 25–30.
3. Loganina, V.I. By organic additive for polystyrene paints / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // Building Materials. – 2008. – №2. – P. 44–46.
4. Loganina, V.I. Prospects of manufacturing organic and mineral supplements based on local raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, T.N. Dmitrieva, V.N. Gorbunov // Trans. Construction. – 2009. – №9. – P. 36–40.
5. Loganina, V.I. Development organomineral additives for dry mortar / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin BSTU. Shukhov. – 2011. – №3. – P. 8–12.
6. Loganina, V.I. The effectiveness of a dry building mixtures of organic additives on the basis of mixed-clay / V.I. Loganina, S.N. Kislitsina, V.V. Cheryachukin, E.R. Akzhigitova // Regional architecture and engineering. – 2012. – №3. – P. 57–59.
7. Loganina, V.I. Dry mix using local materials Penza region / V.I. Loganina, G.D. Fadeeva, E.R. Akzhigitova // Civil Engineering Journal. – 2012. – №8. – P. 37–41.
8. Lopatkin, A.A. Theoretical basis of physical adsorption / A.A. Lopatkin. – М.: Mosk. University Press, 1983. – 339 p.
9. Helfman, M.I. Colloid Chemistry / M.I. Helfman, O.V. Kovalevich, V.P. Yustratov. – Spb.: Publishing house «Lan», 2008. – 336 p.
10. Ovcharenko, G.I. Zeolites in building materials. / G.I. Ovcharenko, V.L. Sviridov, L.K. Kazantsev. – Novosibirsk: Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Sciences, 2000. – 320 p.
11. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Villagers. – М.: Stroizdat, 1987. – 264 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Кадастр
недвижимости и право»

Максимова Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Стандартизация, сертификация
и аудит качества»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Суров Иван Александрович,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Makridin Nikolay Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Technologies of building
materials and wood processing»

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Head of the department
«Cadastral survey of real estate and right»

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Standartization,
certification and quality audit»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Surov Ivan Aleksandrovich,
Postgraduate of the department «Technologies
of building materials and wood processing»

ФАКТОР ВРЕМЕНИ В ФОРМИРОВАНИИ ФАЗОВОГО СОСТАВА СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, И.А. Суров

Экспериментально показано влияние количественной дозировки и процедуры дозирования суперпластификатора на фазовый состав продуктов гидратации цементного камня многолетнего твердения. Структурно-системный анализ фазового состава позволяет сформулировать технологический принцип модифицирования цементной дисперсной системы химическими добавками.

Ключевые слова: цементный камень, химические добавки, структура, фазовый состав.

TIME FACTOR IN FORMATION OF CONCRETE BLOCK MODIFIED STRUCTURE PHASE COMPOSITION

N.I. Makridin, O.V. Tarakanov, I.N. Maksimova, I.A. Surov

The influence of quantitative dosage and procedure of dosing super-plasticizer on the phase composition of the products of the hydration of the concrete block of long-standing hardening is experimentally shown. Structural-system analysis of phase composition makes it possible to formulate the technological principle of the modification of cement dispersal system by chemical additives.

Keywords: concrete block, chemical additives, structure, phase composition.

В настоящее время интенсивно развивается направление по созданию многокомпонентных цементных дисперсных систем нового поколения, модифицированных минеральными и комплексными добавками, позволяющими направленно воздействовать на процессы структурообразования и твердения цементных растворов и бетонов и получать материалы с заданными физико-механическими свойствами.

Сложность получения высококачественных бетонов заключается в особенности гидратационного твердения цементного вяжущего, в процессе которого внесение даже незначительного количества того или иного компонента или изменение условий твер-

дения может привести к кардинальным изменениям структуры и свойств цементных материалов. Вместе с тем современную технологию бетонов невозможно представить без модификаторов различного химического состава и функционального назначения.

С целью определения характера влияния пластифицирующих добавок и процедуры их введения был выполнен комплекс исследований микроструктуры и основных механических свойств, включающий изучение характера изменения основных структурно-механических показателей цементного камня в течение длительного периода твердения (до 18 лет) и состава продуктов гидратации цементного камня. В качестве основных варьируемых факторов были приняты дозировки суперпластификатора (СП) С-3 и процедура введения модификатора в процессе водозатворения.

В таблице приведены характеристики состава, процедуры затворения водой и введения добавки СП С-3 в цементное тесто. Процедура дозирования СП С-3 в замесе серии 4 отличалась тем, что на первой стадии СП не дозировали, а в составах 2 и 3 на первой и второй стадиях его дозировали по 50 % общего объема СП.

Т а б л и ц а

Серия образцов	В/Ц	СП С-3, % по массе	Процедура приготовления цементной пасты
1	0,24	-	Ц+0,12Н ₂ О+0,12Н ₂ О
2	0,24	1,0	Ц+(0,12Н ₂ О+0,5СП)+(0,12Н ₂ О+0,5СП)
3	0,24	0,5	Ц+(0,12Н ₂ О+0,25СП)+(0,12Н ₂ О+0,25СП)
4	0,24	0,5	Ц+0,12Н ₂ О+(0,12Н ₂ О+0,5СП)

Рентгенофазовые исследования составов продуктов гидратации цементного камня выполнялись на дифрактометре ДРОН-7 в интервале брэгговских углов 7-60° с шагом съёмки 0,05°.

На рис. 1 и 2 приведены рентгенограммы опытных образцов сравниваемых серий в возрасте цементного камня 18 лет.

При анализе рентгенограмм составов №1 и №2 установлено, что для образца №2 наблюдается более высокая интенсивность негидратированного алита (2,77; 2,74 Å), что может косвенно свидетельствовать о некотором замедлении гидратации. Однако соотношение интенсивностей алита и Са(ОН)₂ (2,63 Å) примерно одинаково. Для образцов №3 и №4, приведенных на рис. 2, также характерна более высокая интенсивность алита по отношению к составу №1, но для 3-го и 4-го составов возрастает интенсивность Са(ОН)₂ (2,63 Å) относительно алита, что свидетельствует о некоторой активации гидратации силикатных фаз и высвобождении гидратной извести вследствие диспергирующего действия суперпластификатора. В большей степени это проявляется для 4-го состава, для которого характерно разное увеличение интенсивности отражений Са(ОН)₂ (4,93 и 1,93 Å). Это также подтверждает возможность активации гидратации силикатных фаз. Очевидно, что несмотря на увеличение контактной зоны цементных частиц с жидкой фазой в присутствии СП наиболее активно процесс гидратации протекает при первоначальном взаимодействии цементных частиц с чистой водой. Следует отметить, что прочность образцов состава №4, в который на первой стадии вводилась часть чистой воды, а затем – оставшаяся вода с добавкой С-3, превышает прочность не только контрольных образцов, но и образцов, в которых добавка С-3 вводилась хотя и порционно, но первоначально с водой затворения. Таким образом, структура, сформированная при первичном контакте с чистой водой, в период твердения до 18 лет сохраняет более высокие прочностные свойства.

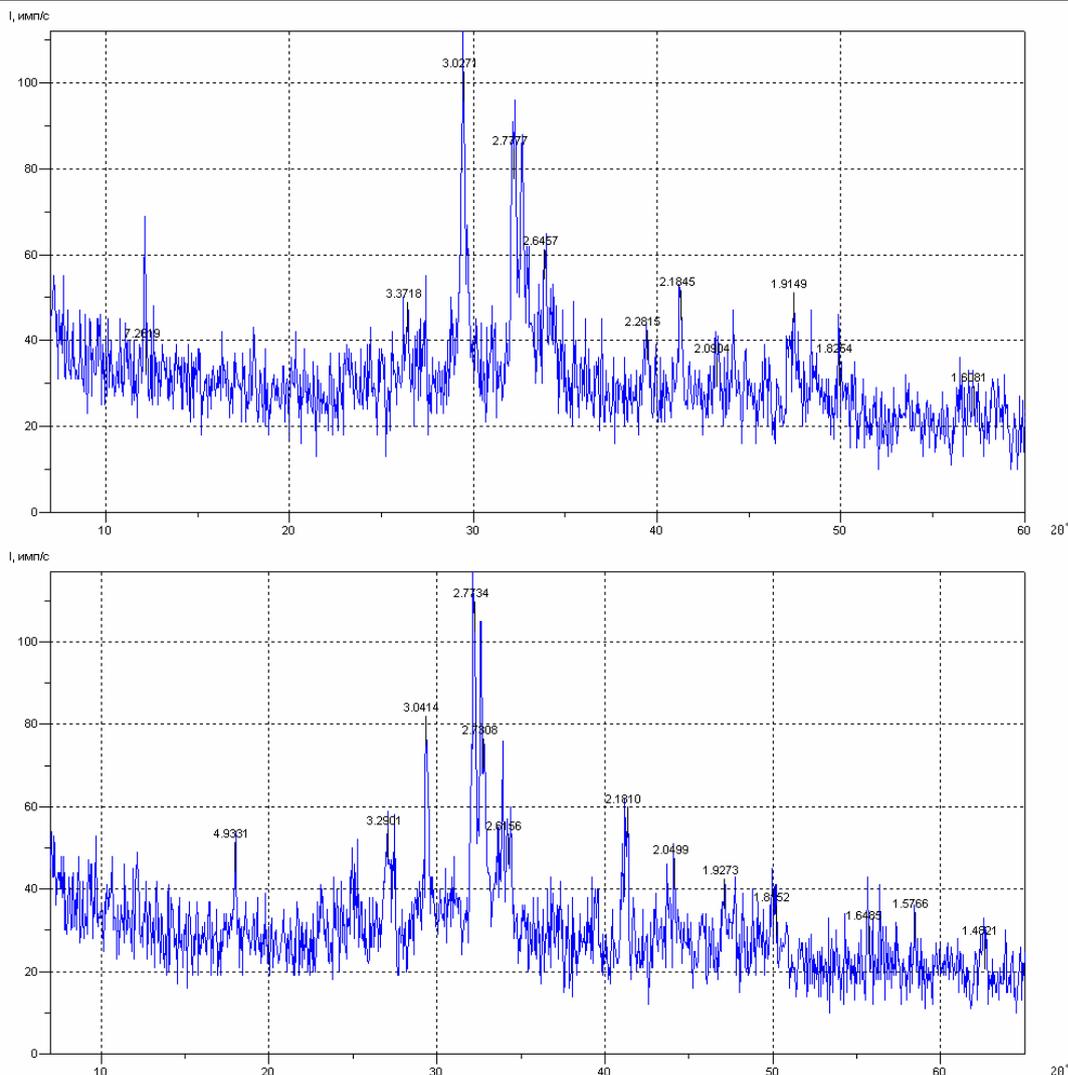


Рис. 1. Рентгенограммы опытных образцов серии 1 и 2

Повышение прочности составов №4 по сравнению с контрольными образцами можно объяснить также диспергирующим влиянием добавки С-3 вследствие увеличения площади контактной зоны в дисперсной системе. Увеличение интенсивности отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 2,63 Å и особенно 4,93, 1,92 Å, в составе №4 свидетельствует об активации гидратации не только силикатных фаз, но и алюминатных, поскольку процесс взаимодействия C_3A и C_4AF с водой связан с экстрагированием CaO из структуры алюминатов, и при дальнейшем взаимодействии алюминатных комплексов с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – с возможностью образования гидроалюминатов кальция различной основности, свойств и структуры.

Характерно, что практически для всех составов с добавкой С-3 наблюдается снижение интенсивности отражений кальцита (3,029 Å) по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о некотором снижении карбонизационных процессов в присутствии суперпластификатора.

В отношении гидросиликатных фаз следует отметить, что в присутствии добавки С-3 (№2 и №3) происходит некоторое снижение интенсивности отражений фазы CSH II (1,82 Å) (кроме №4). В №2, и особенно в №3, отмечаются размытые отражения (1,82 Å) по сравнению с №1, что свидетельствует о том, что в присутствии С-3 возможно образование широкого спектра мелкокристаллических гидросиликатных фаз, имеющих близкую, но искаженную структуру. Об этом косвенно свидетельствуют формы отражений (пиков) гидросиликатных фаз, имеющих ступенчатую несимметричную форму. Формирование многофазовой, мелкокристаллической гидросиликатной структуры может являться одной из причин повышения прочности цементных систем. Косвенно о некотором замедлении гидратации цементной системы в присутствии С-3

можно судить по значительному снижению интенсивности отражений кальцита в составах с добавкой С-3, вводимой одновременно с водой затворения.

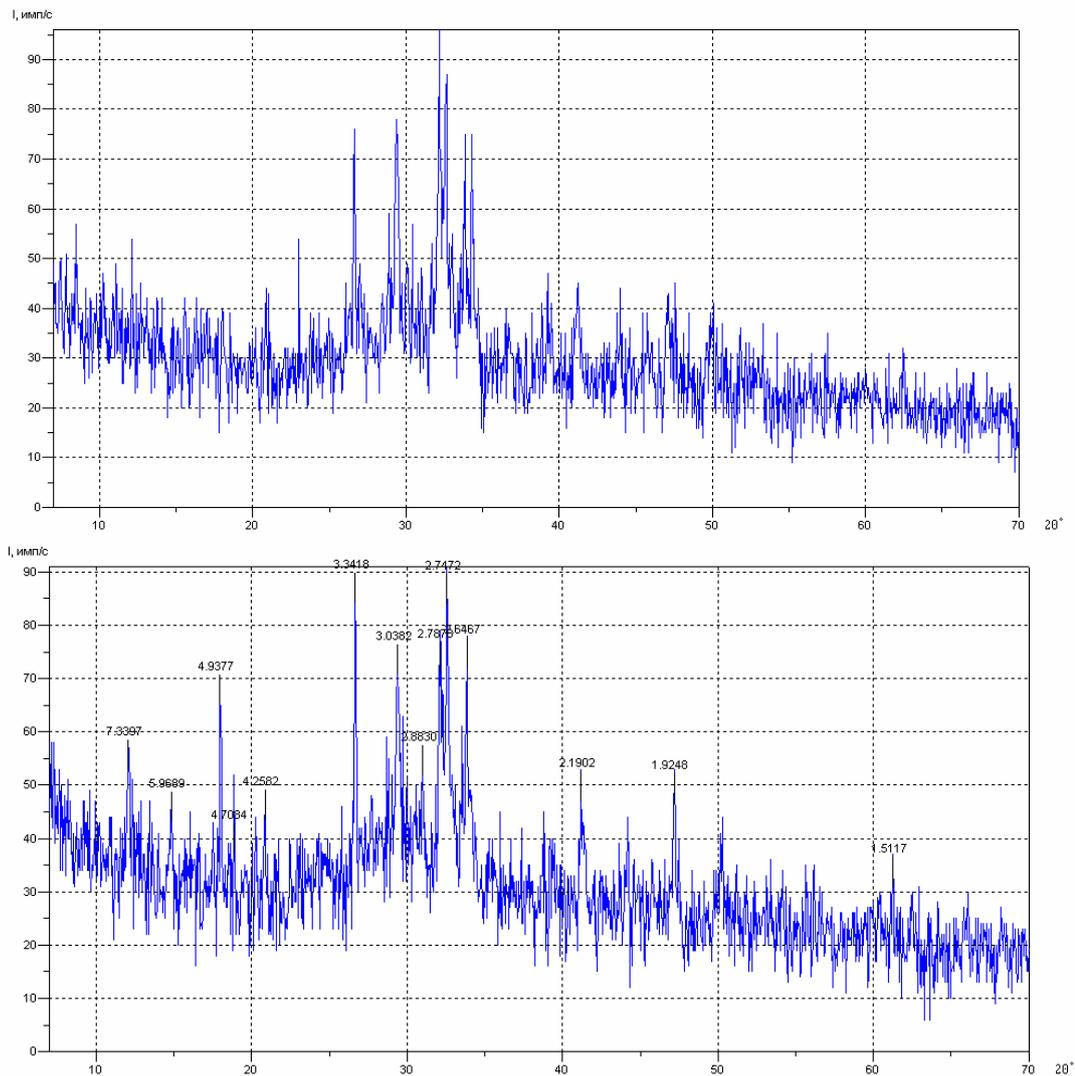


Рис. 2. Рентгенограммы опытных образцов серии 3 и 4

Известно [3], что при адсорбции пластификаторов, и особенно высокомолекулярных, они оказывают влияние на морфологию гидратных фаз. В результате адсорбции изменяется не только форма кристаллов, но и замедляется их рост. Структура гидросиликатных фаз становится мелкокристаллической и состоящей из различных, близких по строению гидратов. С одной стороны, на гидросиликатную систему это оказывает положительное влияние, поскольку переплетение различных фаз в целом упорочняет структуру, с другой стороны, замедляется кристаллизация гидросиликатов – основных носителей прочности цементного камня.

Несколько иначе органические добавки влияют на гидратацию алюминатных составляющих цемента. Отличительной особенностью гидратации алюминатных фаз является стабилизация метастабильных гидроалюминатов кальция и замедление процесса высвобождения межслоевой воды в структуре AFm фаз. Структура гидроалюминатов вследствие высокой скорости их образования и присутствия добавок практически с момента водозатворения становится не только мелкокристаллической, но и значительно искаженной. Вместе с тем в присутствии некоторых органических добавок, содержащих активные функциональные группы, на рентгенограммах гидратированных C_3A и C_4AF резко возрастают количество и интенсивности отражений гидратов C_2AH_8 и C_4AH_{13-19} в отличие от контрольных составов на рентгенограммах, в которых присутствует множество четких отражений, характерных для стабильной

фазы C_3AH_6 . Механизм этой стабилизации до конца не ясен. Однако в основе его лежат электрохимические явления (ион-дипольные, диполь-дипольные и др.), приводящие главным образом к изменению структуры связанной межслоевой воды и затрудняющие её высвобождение и, следовательно, процессы перекристаллизации AFm фаз в наиболее стабильную C_3AH_6 .

При гидратации алюминатных фаз в присутствии органических ПАВ, содержащих активные функциональные группы, адсорбция происходит в основном на продуктах гидратации алюминатных фаз, поскольку дисперсность гидратов значительно превосходит дисперсность исходных минералов. Находясь в диффузионном потоке, зародыши гидратов AFm фаз, образующиеся практически с момента водозатворения, оказываются под влиянием анионоактивных функциональных групп СП, влияющих на координационную среду межслоевых ионов Al^{3+} разрушенных алюминатных комплексов. Это приводит к изменению зарядового состояния межслоевого пространства и к затруднению высвобождения межслоевой воды и, как следствие, к стабилизации гидратов. На стадии кристаллизации гидратов, протекающей в кинетической области, большое влияние на процессы кристаллизации оказывает не только вид и активность функциональных групп, но и концентрация добавок.

При определенных условиях в процессе адсорбции органических ПАВ на активных центрах гидратов (появляющихся уже на стадии образования трехмерных зародышей из пересыщенных растворов) возможна не только адсорбция (хемосорбция) молекул добавок, но и образование новых химических соединений, например, при взаимодействии СП нафталин-формальдегидного типа с алюминатными фазами [3]. Подобные комплексы так же, как и сами добавки, могут оказывать не только стабилизирующее влияние на гидраты, но и препятствовать растворению исходной фазы, перекрывая активные центры.

Касаясь анализа рентгенограмм составов цементного камня без добавок и с добавками С-3, отметим, что в отношении гидроалюминатных фаз характерной особенностью является присутствие четких отражений фазы SAH_{10} в образцах №1 и №4, в которых первичный контакт цементной системы осуществлялся с чистой водой (№1 – контрольный состав; №4 – с добавкой С-3 0,5 % от массы цемента с двухстадийной процедурой водозатворения, при которой добавка вводится во вторую стадию).

В образцах №2 и №3 подобные отражения в области малых углов ($2\theta=15-20^\circ$) отсутствуют. В области средних углов ($2\theta=25-30^\circ$) в образцах №2 и №3 отражения SAH_{10} также присутствуют, но имеют многоступенчатую форму, свидетельствующую об искажении кристаллической структуры. Возможно, что в присутствии добавки С-3, вводимой на первой стадии приготовления, кристаллическая структура SAH_{10} , формирующаяся в цементной системе в ранние сроки и сохраняющаяся на поздних стадиях, имеет искаженную структуру, обусловленную электростатическим влиянием функциональных групп СП. Присутствие сростков кристаллов фазы SAH_{10} , имеющих форму гексагональных призм, является, возможно, одной из причин повышения прочности образцов №4 как в ранние, так и поздние сроки.

Характерной особенностью образцов №3 и №4 с малым содержанием С-3 в интервале углов $15-30^\circ$ является то, что, в отличие от образцов №1 и №2, на их рентгенограммах присутствуют отражения, характерные для эттрингита ($3,85\text{ \AA}$ и $4,69\text{ \AA}$) и C_3AH_6 ($3,37\text{ \AA}$) (особенно хорошо сформировано в №4!). Хотя отражения $3,37\text{ \AA}$ присутствуют и на рентгенограмме образца №1, интенсивность их значительно ниже, чем на рентгенограммах состава №4. Возможно, что введение малого количества чистой воды (состав №4) способствует активации формирования стабильной фазы C_3AH_6 , и последующее введение оставшейся воды с добавкой С-3 не влияет на состояние фазы C_3AH_6 в дальнейшем. Это является весьма положительным фактором с точки зрения формирования в цементной системе стабильных гидроалюминатных структур. Формы отражений, характерные для эттрингита, $2,209\text{ \AA}$ во всех образцах с добавкой С-3 имеют многоступенчатый характер, и интенсивность их несколько выше, чем в №1 (особенно в образце №2). Это свидетельствует о возможности стабилизации эттрингита в присутствии добавки С-3 в период до 18 лет и, кроме того, характер и форма пиков также свидетельствуют о возможных дефектах и искажениях структуры эттрингита. Присутствие и интенсивность отражений, характерных для моногидросульфалюмината кальция в образцах №3 и №4, несколько ниже, чем в образцах №1 и №2, и это свидетельствует о стабильном присутствии этой фазы в течение длительного периода наряду с эттрингитом.

При широком внедрении в строительную практику высокомолекулярных органических добавок СП, при назначении дозировок и, особенно, при значительном водопонижении, в цементных системах следует более внимательно подходить к анализу процессов гидратации цементных минералов и в целом цементных камней, особенно в стесненных условиях, а также к процедуре введения добавки, которая может в значительной степени повлиять на состояние микроструктуры и состав гидратных фаз в течение достаточно длительного периода твердения.

Несмотря на то, что количество гидроалюминатных фаз в цементной системе незначительно и они в меньшей степени, чем гидросиликаты, влияют на прочность цементного камня, их стабилизация и торможение процессов перекристаллизации (а это связано с изменением плотностей гидроалюминатных фаз, высвобождением свободной воды и т.д.) может оказать влияние на колебания прочности цементной системы в целом и, тем более, гидратированной в присутствии СП в стесненных условиях при недостатке воды.

Таким образом, в цементной системе в присутствии органических добавок, содержащих активные функциональные группы, параллельно протекают, с одной стороны, процессы активации гидратации вследствие диспергирования частиц вяжущего, с другой – процессы изменения морфологии гидросиликатов кальция и стабилизация гидроалюминатных фаз. Причем последние могут оказать негативное влияние на долговременную прочность. Известно [1, 4], что для цементных бетонов характерен «пилообразный» характер изменения прочности, сопровождающийся как нарастанием, так и спадом прочности.

Выполненные исследования показали, что в присутствии органических добавок, имеющих активные функциональные группы в цементной системе даже в течение длительного периода твердения, происходят процессы перекристаллизации гидратов. Для силикатных составляющих наиболее характерной особенностью является некоторое торможение гидратации на ранних этапах твердения (при равных В/Ц) и формирование различных по строению, но близких по структуре гидросиликатов кальция, которые в целом, и особенно при значительном водопонижении в присутствии СП, способствуют повышению прочности цементного камня.

Для гидроалюминатных структур в присутствии органических добавок характерной особенностью является стабилизация гидратов AFm и AFt фаз и замедление процессов их перекристаллизации в наиболее стабильные фазы, например C_3AH_6 , и др.

При изменении температурно-влажностных условий твердения, особенно в течение длительного периода, структурные изменения, связанные, например, с дестабилизацией гидроалюминатных фаз, разуплотнением вследствие формирования вторичных кристаллогидратов различной плотности, высвобождением гидратной воды, могут являться одной из причин изменения прочности цементных систем во времени. Это и было отмечено в наших исследованиях в период твердения до 18 лет.

Список литературы

1. Макридин, Н.И. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня: ч.2 / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Овсюкова // Строительные материалы. – 2011. – №7. – С. 72–75.
2. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
3. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
4. Сычев, М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня / М.М. Сычев // ЖПХ АН СССР. – 1981. – Т. LIV. – №9. – С. 2036–2043.

References

1. Makridin, N.I. Long-term strength of the modified structure of the cement stone: part 2 / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Y.N. Ovsyukova // Construction Materials. – 2011. – № 7. – P. 72–75.
2. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting / S.A. Mironov. – 3-rd ed., rev. and enl. – M.: Stroyizdat, 1975. – 700 p.
3. Ratinov, V.B. Concrete admixtures / V.B. Ratinov, T.I. Rozenberg. – M.: Stroyizdat, 1989. – 188 p.
4. Sychev, M.M. Some of the chemistry of concrete and cement / M.M. Sychev // JPCH AN SSSR. – 1981. – T. LIV. – №9. – P. 2036–2043.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Вернигорова Вера Никифоровна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Саденко Денис Сергеевич,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Vernigorova Vera Nikiforovna,
Doctor of Science in Chemistry, Professor
of the department «Technology of building
materials and wood processing»

Sadenko Denis Sergeevich,
Postgraduate of the department «Technology
of building materials and wood processing»

ВОДА ЗАТВОРЕНИЯ КАК МИКРОГЕТЕРОГЕННАЯ ОРГАНИЗОВАННАЯ СРЕДА

В.Н. Вернигорова, Д.С. Саденко

Статья посвящена описанию взаимодействия высокомолекулярных добавок суперпластификатора С-3 и гиперпластификаторов-поликарбоксилатов с водой затворения бетонных смесей, которое приводит к образованию супрамолекулярных ансамблей двух типов: «рецептор-субстрат» и «гость-хозяин». В супрамолекулярных ансамблях вода находится в виде нанокпель и нанопленок и взаимодействует с частицами портландцемента локально. С добавками С-3 и поликарбоксилатов вода затворения представляет собой микрогетерогенную организованную среду.

Ключевые слова: суперпластификаторы (СП) и гиперпластификаторы (ГП), мицеллообразование, супрамолекулярные ансамбли, «рецептор-субстрат»; «гость-хозяин», нанопленки и нанокпели воды, микрогетерогенная организованная среда.

MIXING WATER AS MICROHETEROGENEOUS ORGANIZED ENVIRONMENT

V.N. Vernigorova, D.S. Sadenko

The article is devoted to the interaction of superplasticizer C-3, highmolecular additives and hyperplasticizer – polycarboxylates with concrete mixture mixing water that leads to formation of super-molecular ensembles of two types: «receptor-substratum» and «visitor-owner». In super-molecular ensembles water is in a form of nano-drops and nano-films and locally interacts with Portland cement particles. Mixing water with C-3 and polycarboxylates additives represents the microheterogeneous organised environment.

Keywords: superplasticizer (SP) and giperplastifikatory (GP), micelle, supramolecular assemblies, "receptor-substrate", "guest-host", nano-films and nanodroplet water microheterogeneous organized environment.

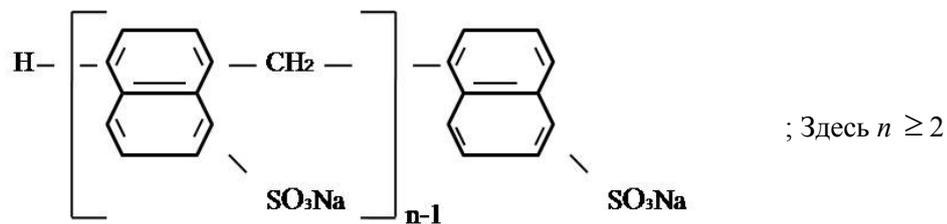
Рассматривается взаимодействие супермолекул суперпластификатора (СП) С-3 и гиперпластификаторов (ГП) с водой; вследствие разной структуры СП и ГП взаимодействие их с водой приводит к образованию супрамолекулярных ансамблей типа «рецептор-субстрат» и «гость-хозяин». Поскольку содержание добавок СП и ГП сравнительно велико, то такое взаимодействие СП и ГП с водой приводит к формированию микрогетерогенной организованной среды.

Современное производство бетонов невозможно представить без применения различного типа добавок, которые позволяют совершенствовать свойства бетона, существенно снизить уровень затрат на единицу продукции, повысить качество и эффективность большой номенклатуры железобетонных конструкций, увеличить долговечность зданий и сооружений в целом. Количество используемых добавок в настоя-

щее время составляет более 300 наименований. В качестве добавок используются химические вещества как органического, так и неорганического строения, а также различные отходы и попутные продукты многих отраслей промышленности. Для правильного выбора добавок необходимо иметь четкое представление не только о классификации, но и механизме их действия.

Несмотря на большое количество добавок, используемых для модификации строительных растворов, бетонных смесей и бетонов, в последние десятилетия широкое применение в технологии бетонов нашли суперпластификаторы (СП) и гиперпластификаторы (ГП). Это высокомолекулярные вещества и их смеси, которые обладают высокой диспергирующей способностью, повышают пластичность бетонных смесей, позволяют довести до минимума количество воды затворения. Как высокомолекулярные вещества СП и ГП в макромолекулах содержат большое число активных основных и кислотных заместителей.

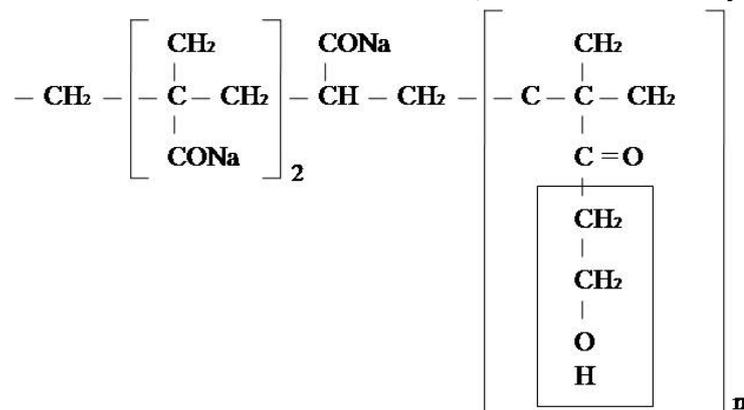
Наибольшее применение нашли СП – разжижитель С-3, представляющий собой 33–39 %-й раствор или водорастворимый порошок. В химическом плане С-3 – это смесь натриевых солей продуктов конденсации нафталинсульфокислот с формальдегидом, лигносульфонатов и сульфата натрия. Активным веществом СП С-3 является смесь полиметиленаполинафталинсульфонатов общей формулы:



СП С-3 растворяется в воде и диссоциирует на ионы водорода H^+ , катионы натрия Na^+ и отрицательно заряженный полимер – анион. Анион содержит несколько бензольных ядер с сопряженной π -системой электронов и сульфогруппой SO_3 с неподеленными парами электронов у атомов и, следовательно, является адсорбентом с несколькими центрами адсорбции.

Однако, как показывает практика, наиболее эффективными являются полимерные суперпластификаторы – поликарбоксилаты, получившие название гиперпластификаторов – ГП.

Поликарбоксилаты – это гребнеобразные полимеры. Макромолекулы ГП состоят из основной цепи с подвесными боковыми цепями, напоминающими зубья расчески.



Приведенная природа химического состава поликарбоксилата позволяет наращивать боковые цепи, вводить в них новые функциональные группы, то есть модифицировать супермолекулу поликарбоксилата. Однако высокая гибкость состава, лежащая в основе поликарбоксилатов, приносит пользу только в том случае, если исследователь хорошо разбирается в нюансах других материалов, входящих в состав портландцемента. Для карбоксилатов важно знать архитектуру супермолекулы, чтобы лучше понимать, почему же их использование в бетонной смеси дает такие

преимущества и гибкость. Основная цепь супермолекулы поликарбоксилата выполняет две функции: место размещения активных центров связывания с поверхностью частиц цемента и предоставление активных точек закрепления для боковых цепей. Подвесные боковые цепи являются стерическими преградами для повторного агрегирования частиц цемента. Формой существования и С-3, и поликарбоксилатов являются супермолекулы как предмет исследования супрамолекулярной химии. Рассмотрим внимательно строение молекул С-3 и поликарбоксилата. Супермолекулы С-3 содержат бензольные ядра, в которых атомы углерода находятся в sp^2 -гибридном состоянии, вследствие чего структура бензольных ядер плоская, а супермолекулы жесткие, прямые даже в растворах. Такие супермолекулы при адсорбции ориентируются параллельно поверхности частиц цемента.

В супермолекулах гиперпластификаторов бензольные ядра отсутствуют, и ориентация их при адсорбции на поверхности частиц может быть и параллельной, и перпендикулярной, в зависимости от природы функциональных групп и концентрации поликарбоксилата. С-3 и поликарбоксилатные эфиры вводятся в бетонную смесь вместе с водой затворения. Полученный пластифицирующий эффект объясняется действием добавок СП и ГП, но не воды. Считается, что вода здесь роли не играет. Однако супермолекулы СП и ГП содержат химически активные функциональные группы, которые взаимодействуют с водой. Такое взаимодействие совершенно очевидно, так как названные модификаторы, кроме пластифицирования, оказывают влияние на технологические и эксплуатационные свойства, а главное – на процессы схватывания и твердения, в которых главную роль выполняет вода. Взаимодействие добавок СП и ГП с водой изменяет ее структуру и свойства. Супермолекулы СП и ГП являются дифильными, состоящими из неполярной углеводородной части и полярных функциональных групп. Такие супермолекулы обладают поверхностной активностью на границе раздела любых фаз.

Вода – структурированная жидкость; молекулы воды образуют элементарные кристаллические гексагональные каркасы с пустотами. Структура воды напоминает жидкие кристаллы. Введение добавок СП и ГП оказывает влияние на структуру воды, которая зависит от геометрической конфигурации супермолекул и их концентрации. Произведем простой расчет концентрации добавки в воде затворения для получения 1 м^3 бетонной смеси марки 250:

Расход на 1 м^3 бетона;

Цемент – 255 кг;

Песок – 578 кг;

Щебень – 1184 кг;

Вода – 195 кг.

Предположим, что масса добавки составляет 0,1 % от массы цемента: $0,01 \cdot 255 \text{ кг} = 2,55 \text{ кг}$ или 2550 г.

Содержание добавки в 1 л воды будет равно:

$$C_d = \frac{2550}{195} = 13,078 \text{ г/л.}$$

Добавки С-3, мелмент, мелфлюкс являются поверхностно-активными веществами (ПАВ), поэтому при введении их в воду затворения супрамолекулы добавок начинают распознавать друг друга, вследствие чего происходит самосборка супрамолекулярных ансамблей, называемых мицеллами. Самоорганизация, или мицеллообразование, происходит только при определенной концентрации добавок, так называемой «критической концентрации мицеллообразования» – ККМ, при достижении которой в воде затворения происходит самосборка агрегатов – мицелл, движущей силой которой является уменьшение поверхностной энергии супермолекул добавок и уменьшение контакта углеводородной части с полярными молекулами воды. Обычно ККМ растворов ПАВ составляет около 10^{-2} – 10^{-3} моль/л. Содержание добавок С-3, мелмент, мелфлюкс превосходит во много раз ККМ. Следовательно, вода затворения с добавками не является гомогенной средой. Это микрогетерогенная среда, содержащая растворитель – воду и огромное число супрамолекулярных ансамблей из супермолекул добавок.

Супермолекулы супрамолекулярного ансамбля мицеллы коллективно образуют собственную наноразмерную псевдофазу, свойства среды которой резко отличаются от основного растворителя – воды. Таким образом, вода затворения с добавками пред-

ставляет собой микрогетерогенную организованную среду. Тип организованной среды – воды затворения зависит от геометрической конфигурации супермолекул добавок.

В воде затворения в зависимости от этого формируются два типа организованных сред: 1) среды, содержащие организованные мицеллярные системы и 2) среды, содержащие молекулы-рецепторы. Сравнивая строение супермолекул СП С-3 и поликарбоксилата, можно утверждать, что супермолекулы С-3 – это молекулы-рецепторы, а молекулы воды выступают в качестве субстрата. Гребнеобразные со множеством боковых цепей супермолекулы поликарбоксилатов способны образовывать с молекулами воды супрамолекулярные агрегаты по типу «гость-хозяин». Супермолекулы поликарбоксилатов в воде затворения способны образовывать мицеллы в виде гибких пространственных сеток. Длина связей между атомами углерода в цепи составляет 0,1–0,15 нм; между боковыми цепями – 0,3–0,4 нм. Диаметр молекулы воды – 0,276 нм. Такое соотношение размеров позволяет молекулам воды распределиться в ячейках пространственной сетки ГП с образованием микрокапсул, частицы в которых являются нанокляпями воды. Нанокляпья воды, диспергированные в пространственной мицеллярной сетке ГП, выполняют роль микрореакторов для синтеза наночастиц гидросиликатов кальция.

Жесткоцепные супермолекулы СП С-3 также ориентируют молекулы воды в определенном направлении. Стабилизируют кристаллические гексагональные каркасы; в такой структуре протоны могут перемещаться и участвовать в процессе конденсации тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Так как супермолекулы С-3 имеют плоскую структуру, то вода внедряется между плоскими супермолекулами в виде тонких пленок. В бетонной смеси жесткие макромолекулы С-3 на поверхности частиц портландцемента образуют полупроницаемые нанопленки, выполняющие роль смазки. Между пленками СП С-3 и частицами портландцемента располагаются пленки воды. Взаимодействие такой воды с минералами портландцемента зависит от толщины пленок. Если толщина пленки воды менее 0,01 нм, то такая пленка воды представляет собой жесткий каркас, в котором протоны водорода неподвижны и не участвуют в процессе конденсации тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$; наблюдается замедление процессов схватывания и твердения. Если толщина нанопленки воды составляет 0,1 нм, то такая вода активна, поляризована, может образовывать и водородные донорно-акцепторные связи с активными центрами минералов алита и белита.

Таким образом, супермолекулы добавок СП С-3 в воде затворения образуют жесткоцепные плоские ансамбли-рецепторы, а молекулы воды являются субстратом. Супермолекулы поликарбоксилатных эфиров образуют в воде затворения мицеллярные ансамбли типа «гость-хозяин». «Хозяином» является сетка из супрамолекул поликарбоксилатов, а роль «гостя» выполняют молекулы воды.

В состав сложных мицеллярных систем и сред, содержащих молекулы-рецепторы, могут входить и два-три других компонента и образовывать с ним комплексные соединения. Такими компонентами могут быть катионы металлов, спирты, углеводороды другой структуры. Своеобразие наноразмерной фазы, создаваемой добавками СП и ГП с молекулами воды, состоит в том, что она практически не имеет макроскопического аналога. Вода затворения с добавками СП и ГП является микрогетерогенной средой и отличается от гомогенного раствора тем, что определяющую роль в микрогетерогенной воде затворения играет локальный эффект, связанный с коллоидным растворением полярных молекул воды в нанобъемах сетки из супермолекул поликарбоксилатов (мицеллярная система) и полостях супермолекул-рецепторов СП полинафталинсульфокислоты или ее солей. Свойства и реакционная способность сольубилизованных молекул воды изменяются, но только в их микроокружении. Мицеллярные системы поликарбоксилатов в воде затворения и жесткоцепные супермолекулы-рецепторы суперпластификатора С-3 образуются и на поверхности твердых частиц портландцемента, формируя полумицеллы (гемимицеллы), адсорбционные мицеллы или бислои, или наноразмерные пленки типа пленок Ленгмюра–Блоджетт (ПЛБ). Таким образом, вместе с СП С-3 и поликарбоксилатными эфирами в бетонную смесь вводится структурированная упорядоченная вода в виде нанопленок и микрокапсул, стабилизированных супермолекулами С-3 и поликарбоксилатов. Вода в нанопленках и микрокапсулах взаимодействует с частицами вяжущего локально, и этому взаимодействию остальная объемная вода не мешает.

Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарева

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

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»,
советник РААСН
E-mail: nizinata@yandex.ru

Балбалин Алексей Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: 06.89@mail.ru

The Mordvian State University named
after N.P.Ogaryov

Russia, 430005, Saransk, 24, Soviet St.,
tel./fax: (8342) 47-71-56

Nizina Tatyana Anatolevna,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building designs», Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences
E-mail: nizinata@yandex.ru

Balbalin Alexey Vladimirovich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: 06.89@mail.ru

МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ

Т.А. Низина, А.В. Балбалин

Рассматривается влияние механической активации на свойства цементных смесей с полифункциональными добавками. Приводится анализ изменения водопотребности и предела прочности цементных композитов при сжатии.

Ключевые слова: механическая активация, микрокремнезем, метаксаолин, суперпластификатор, предел прочности при сжатии, водопотребность.

MECHANICAL ACTIVATION OF CEMENT MIXTURES WITH MULTIFUNCTIONAL ADDITIVES

T.A. Nizina, A.V. Balbalin

Influence of mechanical activation on the properties of cement mixtures with multifunctional additives is regarded. Analysis of changes in water demand and compressive strength of cement composites is given.

Keywords: mechanical activation, silica fume, metakaolin, superplasticizer, compressive strength, water demand.

Физические процессы трения или измельчения, связанные с приложением механических сил, становятся причиной химических реакций или изменения реакционной способности твердых веществ. Известно, что вещества в тонкодисперсном состоянии характеризуются не совсем обычными свойствами: они становятся более химически активными. Особый класс химических процессов, обусловленных приложением механических сил, был выделен В. Оствальдом в 1887 г.; им же введен в литературу термин «механохимия» [1].

Проведение механической активации в мельницах – наиболее распространенная операция в механохимии. По-видимому, это обусловлено, во-первых, относительной простотой проведения измельчения и, во-вторых, тем интересом, который проявляют к механохимии технологи, поскольку шаровые барабанные мельницы широко применяются для осуществления механического воздействия на вещество. Вместе с тем и механика, и физика процессов, происходящих в таких аппаратах, до сих пор остаются предметом многочисленных исследований. Большая часть этих исследований посвящена в основном оптимизации стадии измельчения с целью получения максимальной поверхности твердого вещества при минимальных затратах энергии. Работ, посвящен-

ных использованию мельниц для проведения механической активации, опубликовано значительно меньше [2].

Состав растворяемых и бетонных смесей, применяемых в настоящее время, представляет собой сложную смесь вяжущих веществ, заполнителей и функциональных добавок; поэтому особый интерес представляют исследования влияния механической активации именно на поликомпонентные смеси.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент»;
- микрокремнезем конденсированный уплотненный (г. Новокузнецк) – МК;
- высокоактивный метакаолин – ВМК;
- речной песок (Республика Мордовия, Ичалковский район, посёлок Смольный);
- поликарбоксилатный пластификатор для строительных материалов на основе цементных вяжущих Melflux 1641 F (MF 1641);
- наномодификатор на основе водорастворимых аддуктов нанокластеров углерода (АНКУ).

Исследуемые факторы и уровни их варьирования приведены в таблице. Скоростная обработка смесей производилась в шаровой барабанной мельнице; скорость вращения составляла 73 об/мин. В ходе данной работы применялись следующие режимы активации:

- режим 0 – без механоактивации;
- режим 1 – (цемент + MF 1641) (15 мин) + МК/ВМК (15 мин) + песок (15 мин);
- режим 2 – (цемент + MF 1641 + МК/ВМК) (15 мин) + песок (15 мин).

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Факторы		Уровни варьирования исследуемых факторов		
Обозначение	Наименование	-1	0	+1
x_1	Содержание МК, % от массы цемента	0	7,5	15
x_2	Содержание ВМК, % от массы цемента	0	2,5	5
x_3	Доля песка, % от общей массы смеси	55	65	75
x_4	Содержание пластификатора MF 1641, % от массы цемента	0	0,4	0,8
x_5	Содержание АНКУ, % от массы пластификатора MF 1641	0	3	6
x_6	Режим помола	Режим 0	Режим 1	Режим 2

При проведении исследования [3] было установлено, что наиболее целесообразна механоактивация цемента с попутной его модификацией за счет введения функциональных добавок, изменяющих любые свойства цементного композита. Поэтому при реализации режима 1 первоначальной механоактивации (в течение 15 минут) подвергалась смесь цемента с пластификатором, затем вводился микрокремнезем или метакаолин, и проводился дополнительный помол смеси в течение еще 15 минут. При реализации режима 2 осуществлялся совместный помол цемента, пластификатора и минеральных добавок в течение 15 минут. После завершения процесса механоактивации полифункциональных вяжущих в смесь вводился песок, и проводился дополнительный помол в течение 15 минут. Выбор длительности помола песка осуществлялся на основе анализа графиков изменения кривых плотности распределения эквивалентных радиусов, представленных на рис. 1. Анализ изменения частиц песка в процессе помола выполнялся с помощью программного комплекса «Анализатор распределения частиц наполнителя по размерам» [4]. Установлено, что при длительности помола

более 30 минут эффективность измельчения снижается, а дальнейший прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии и становится экономически невыгодным.

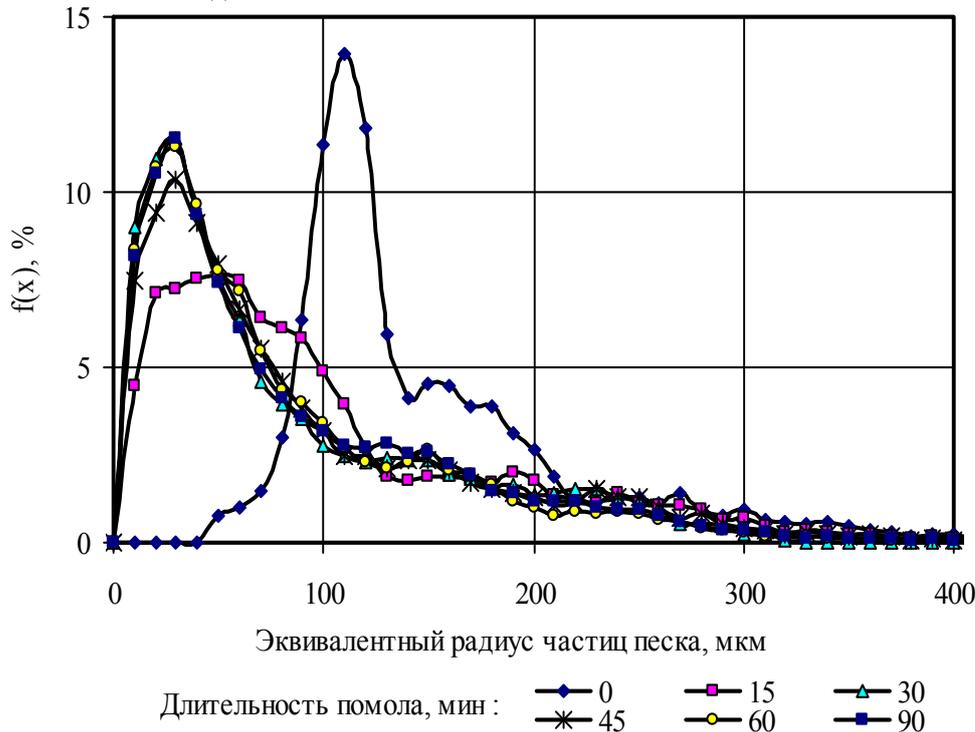


Рис. 1. Плотность кривых распределения эквивалентных радиусов частиц песка в зависимости от длительности помола

При проведении исследования в качестве плана эксперимента был выбран план Хартли типа H_{a5} с 27 опытами. В ходе исследования было реализовано 45 опытов (с учетом повторов) для выявления раздельного воздействия микрокремнезема конденсированного уплотненного и высокоактивного метакаолина. В качестве контролируемых параметров оценивались водопотребность, а также плотность и предел прочности при сжатии модифицированных цементных растворов в возрасте 3, 7 и 28 суток.

После обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены коэффициенты полиномиальных уравнений:

- для микрокремнезема конденсированного уплотненного

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\
 & + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{16} \cdot x_1 \cdot x_6 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{36} \cdot x_3 \cdot x_6 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + \\
 & + b_{46} \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{56} \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{66} \cdot x_6^2 + \\
 & + b_{1345} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{1346} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{1356} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_6 + \\
 & + b_{1456} \cdot x_1 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{3456} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{13456} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6;
 \end{aligned} \tag{1}$$

- для высокоактивного метакаолина

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + \\
 & + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{26} \cdot x_2 \cdot x_6 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{36} \cdot x_3 \cdot x_6 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + \\
 & + b_{46} \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{56} \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{66} \cdot x_6^2 + \\
 & + b_{2345} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{2346} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{2356} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_6 + \\
 & + b_{2456} \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{3456} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{23456} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6;
 \end{aligned} \tag{2}$$

и выполнен их анализ. В результате проведения матричных операций получены уравнения, описывающие изменение характеристик цементных растворов в зависимости от исследуемых факторов.

При разработке и исследовании строительных материалов на основе многокомпонентных систем (особенно, содержащих техногенные сырьевые компоненты), подвергающихся технологическим воздействиям по сложным режимам, целесообразно осуществлять построение экспериментально-статистических моделей. ЭС-модели позволяют получать новую научную и инженерную информацию с использованием методов компьютерного строительного материаловедения [5]. С помощью разработанной Одесской школой материаловедения под руководством Виталия Анатольевича Вознесенского методологии исследования и проектирования строительных материалов на основе концепции полей свойств можно получать новую информацию о материалах и находить рецептурно-технологические решения, проводя вычислительные эксперименты.

Особую роль в технологических задачах играет поверхность, соответствующая требуемому уровню $Y = Y_{\text{треб}}$. Это граница, которая делит поле на две области – область допустимых решений ($Y \geq Y_{\text{треб}}$) и запрещенную область ($Y < Y_{\text{треб}}$). Объем допустимой области Ω ($0 \leq \Omega \leq 100\%$) характеризует устойчивость технологии и является одним из основных обобщающих показателей полей свойств материала. Чем ближе значение Ω к нулю, тем сложнее (или дороже) технологически реализовать выбранное в этой области эффективное решение [6].

Величина Ω определяется по формуле

$$\Omega = \frac{n}{N} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где n – количество значений, удовлетворяющих заданному условию ($Y \geq Y_{\text{треб}}$); N – общее количество значений.

Для подсчета объема допустимой области в исследуемом диапазоне генерировалось около 4000 точек. Затем производились расчет предсказанных значений критериев оптимизации, сортировка и подсчет количества величин, удовлетворяющих условию ($Y \geq Y_{\text{треб}}$).

Анализ изменения объема допустимой области при исследовании модифицированных цементных растворов показал, что составы с метакаолином обладают большей прочностью и плотностью по сравнению с составами, содержащими микрокремнезем (рис. 2-4). В возрасте 3 суток около 90 % возможных составов с ВМК имеют прочность более 22 МПа, а с МК – 10 МПа; в возрасте 7 суток – соответственно 25 и 20 МПа; в возрасте 28 суток – 35 и 22 МПа.

Исследуемые добавки относятся к группе пуццолановых модификаторов, используются в высокоподвижных (самонивелирующихся) сухих смесях для снижения расхода вяжущего, а также для стабилизации смеси и предотвращения водоотделения и высолообразования. Микрокремнезем – отход производства кремнийсодержащих сплавов, состоящий из сферических частиц размером 0,01-0,1 мкм и содержащий до 95 % чистого аморфного кремнезема. Наибольшая прочность для составов, содержащих МК, получена при 1-м режиме помола (рис. 3, а).

По своей химической природе ВМК, представляющий собой смесь аморфного кремнезема и глинозема практически в равных количествах, существенно отличается от МК. Высокоактивный метакаолин – искусственный, экологически чистый материал, продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) – это порошок от белого до серовато-бежевого или розового цвета со средним размером частиц 1-5 мкм.

Вследствие механической активации на поверхности минеральных наполнителей концентрируется дополнительная энергия в виде дефектов или других изменений, которые позволяют снизить энергию активации последующего химического превращения. В отличие от микрокремнезема, метакаолин состоит из менее твердых частиц пластинчатой формы, что, предположительно, и позволяет достичь большего прироста прочности при механической активации смеси. Наибольшая прочность для составов, содержащих ВМК, получена при 2-м режиме помола (рис. 4, б).

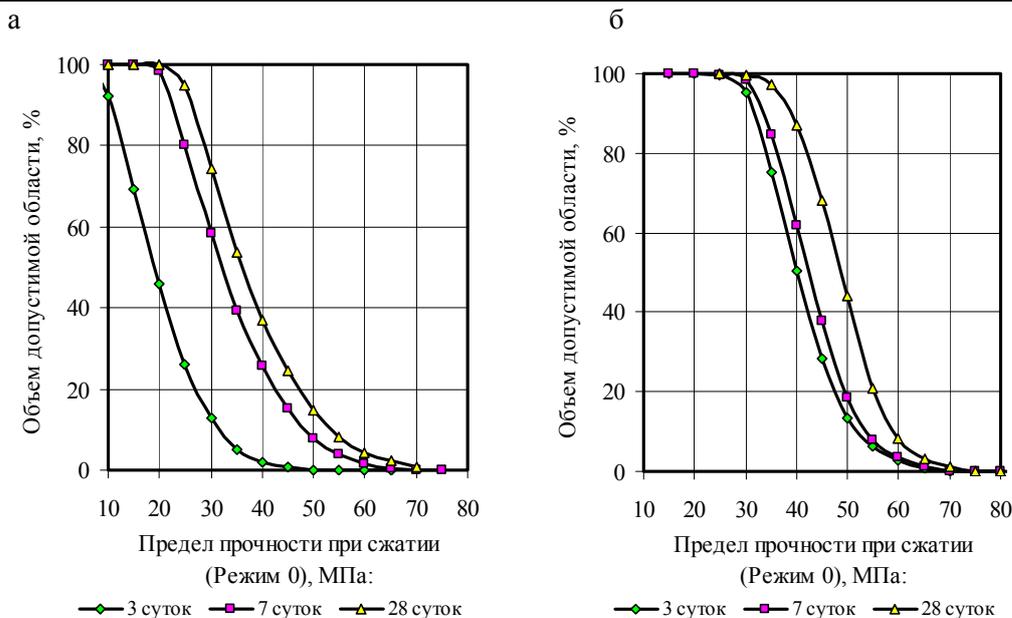


Рис. 2. Объем допустимой области предела прочности при сжатии (режим 0): а – составы с МК; б – составы с ВМК

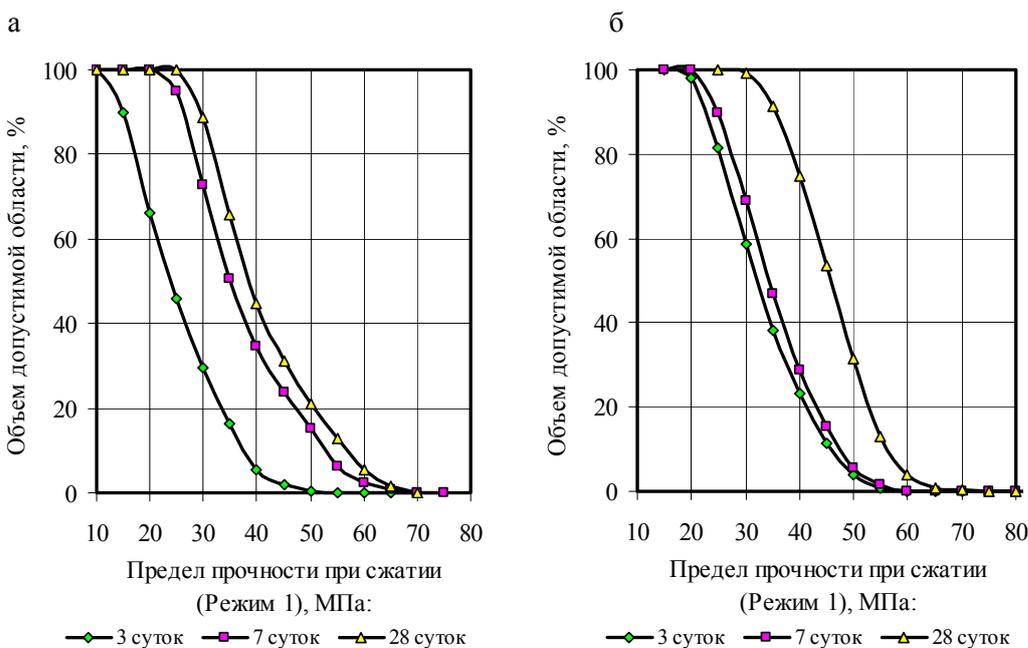


Рис. 3. Объем допустимой области предела прочности при сжатии (режим 1): а – составы с МК; б – составы с ВМК

Ультрадисперсный размер частиц минеральных добавок обуславливает их высокую водопотребность и загущающую способность в цементных растворах и бетонах, что приводит к необходимости введения в их состав пластификаторов для компенсации загущающего эффекта. Приведенные в работе [7] результаты исследований показали, что введение в состав цементных композиций поликарбоксилатного пластификатора Melflux 1641 F до 0,8 % от массы вяжущего позволяет значительно (до 40 %) снизить водопотребность составов с минеральными добавками. Анализ влияния механической активации смесей показал возможность дальнейшего снижения их водопотребности (рис. 5). Наибольший эффект снижения водопотребности за счет механической активации зафиксирован для составов, содержащих микрокремнезем. Однако, в целом, по абсолютным значениям составы с ВМК, как правило, обладают более низкой

водопотребностью. В среднем механическая активация позволила уменьшить водопотребность, соответственно для 1-го и 2-го режимов помола, для составов с МК на 13 и 15 %, для составов с ВМК – на 4 и 13 %.

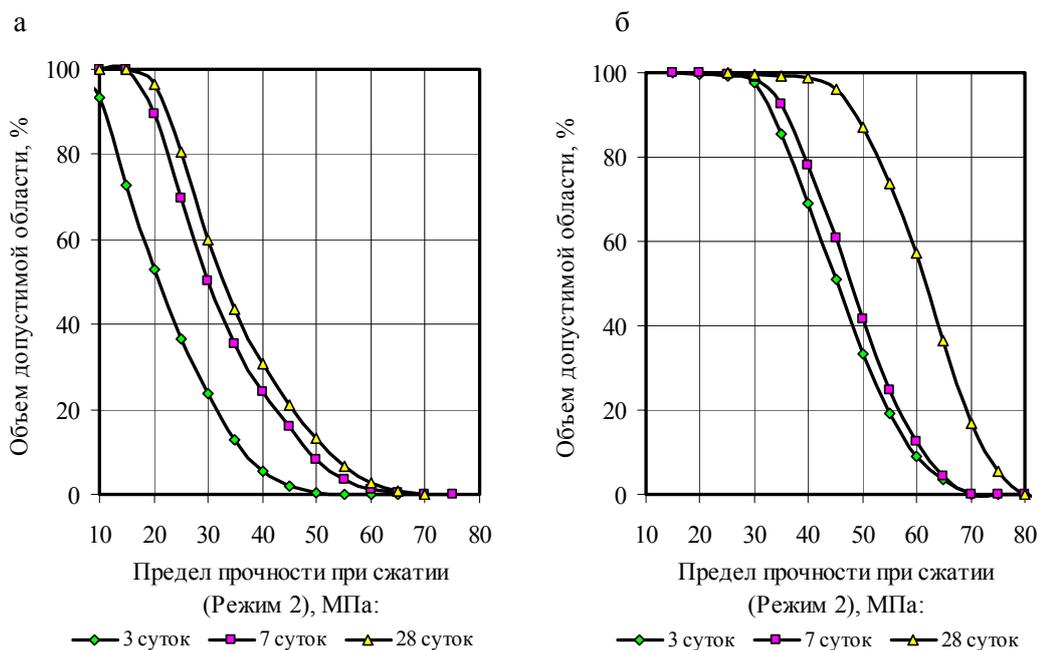


Рис. 4. Объем допустимой области предела прочности при сжатии (режим 2):
а – составы с МК; б – составы с ВМК

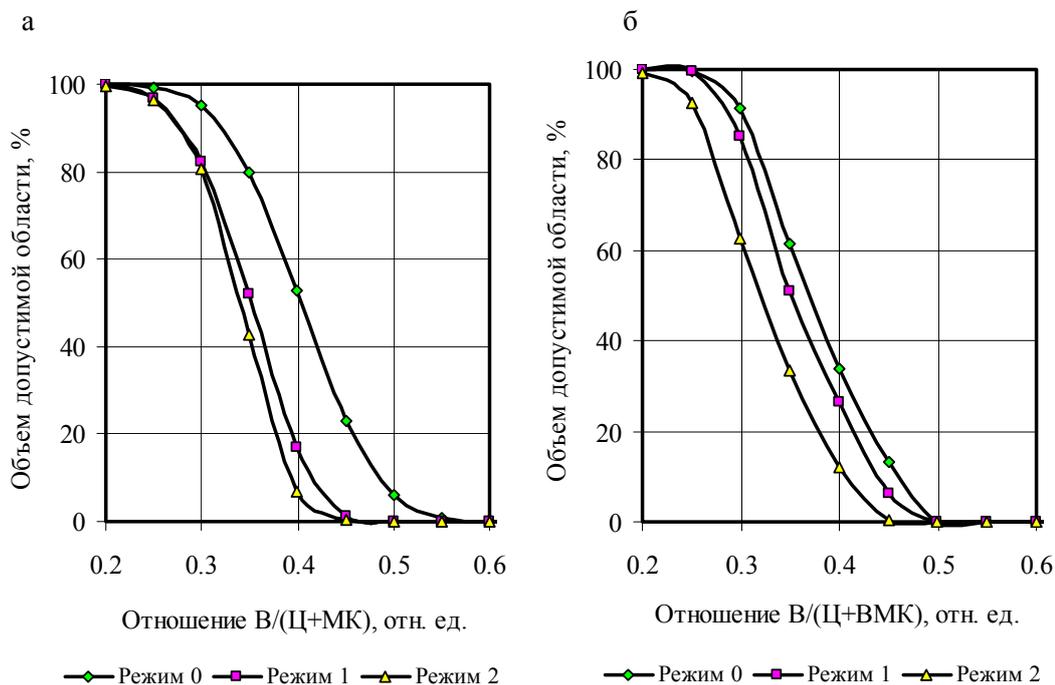


Рис. 5. Объем допустимой области водопотребности:
а – составы с МК; б – составы с ВМК

Полученные в ходе проведенных исследований результаты показывают целесообразность использования механической активации поликомпонентных цементных смесей совместно с функциональными добавками (МД, пластификатор, АНКУ). При механоактивации увеличивается количество дефектов на поверхности частиц, что приводит к формированию дополнительных новообразований при гидратации цемента.

Это позволяет регулировать кинетику твердения, существенно снизить водопотребность смесей, в результате повышаются прочность и плотность цементных композитов.

Работы в этой области еще далеки от завершения и, по-видимому, должны быть усилены в связи с перспективами технологического использования механохимических процессов. Более того, как указывает академик В.В. Болдырев [2], механизмы процессов, которые происходят в механохимических реакторах, пока полностью не установлены. Частично это обусловлено сложностью данных процессов, но главная причина заключается в том, что изучение этих механизмов часто и не ставится как цель: исследователи ограничиваются получением материала с заданными свойствами или желаемыми характеристиками химического процесса. Однако, чтобы управлять этими процессами, нужно знать их механизмы.

Список литературы

1. Молчанов, В.И. Активация минералов при измельчении / В.И. Молчанов, О.Г. Селезнева, Е.Н. Жирнов. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
2. Болдырев, В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ / В.В. Болдырев // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 3. – С. 203–216.
3. Кузьмина, В.П. Эффективность применения механоактивации при производстве сухих строительных смесей / В.П. Кузьмина // Сухие строительные смеси. – 2011. – № 2. – С. 32–35.
4. Селяев, В.П. Анализатор распределения частиц наполнителя по размерам / В.П. Селяев, Т.А. Низина, В.А. Минеев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611001 от 6.03.2007 г. в Роспатенте по заявке №2007610002 от 11.01.2007 г.
5. Вознесенский, В.А. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (повышение прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурсов) / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, А.Д. Довгань // Современное промышленное и гражданское строительство. – Т. 3, № 1. – 2007. – С. 5–15.
6. Ляшенко, Т.В. Области допустимых технологических решений в полном и локальных полях свойств композитов / Т.В. Ляшенко // Вісник Одес. ДАБА. – Одеса: Місто майстрів. – 2001. – Вип. 5. – С. 75–80.
7. Низина, Т.А. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов / Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 148–153.

References

1. Molchanov, V.I. Activation of minerals during grinding / V.I. Molchanov, O.G. Selezneva, E.N. Zhirnov. – Moscow: Nedra, 1988. – 208 p.
2. Boldyrev, V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids / V.V. Boldyrev // Russian Chemical Reviews. – 2006. – V. 75, № 3. – P. 203–216.
3. Kuzmina, V.P. The effectiveness of mechanical activation in the production of dry construction mixtures / V.P. Kuzmina // Dry Construction Mixtures. – 2011. – № 2. – P. 32–35.
4. Selyaev, V.P. Analyzer distribution of the filler particles by size / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, V.A. Mineev // Certificate of official registration of computer programs №2007611001 of 03.06.2007, Rospatent application №2007610002 of 11.01.2007.
5. Voznesensky, V.A. A compromise multifactor optimization of a guaranteed quality of slag-alkali binders (strength freeze resistance increase, minimization of resource rate) / V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko, O.D. Dovgan // Modern Industrial and Civil Construction journal. – 2007 – V. 3, № 1. – P. 5–15.
6. Lyashenko, T.V. Allowable area of technology in full and local property fields of the composites / T.V. Lyashenko // News of Odes. DABA. – Odessa: City masters. – 2001. – Vol. 5. – P. 75–80.
7. Nizina, T.A. Influence of mineral additives on rheological and strength characteristics of cement composites / T. A. Nizina, A. V. Balbalin // Vestnik of TSUAB. – 2012. – № 2. – С. 148–153.

УДК 691.542:666.971.16

*Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарева*

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

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»,
советник РААСН
E-mail: nizinata@yandex.ru

Кочетков Сергей Николаевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: ser.ko@mail.ru

Пономарев Андрей Николаевич,
кандидат технических наук, профессор,
генеральный директор ЗАО «НТЦ
Прикладных Нанотехнологий»
E-mail: 9293522@gmail.ru

Козеев Александр Алексеевич,
старший научный сотрудник ЗАО «НТЦ
Прикладных Нанотехнологий»
E-mail: alex.kozeev@yandex.ru

*The Mordvian State University named
after N.P.Ogaryov*

Russia, 430005, Saransk, 24, Soviet St.,
tel./fax: (8342) 47-71-56

Nizina Tatyana Anatolevna,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building designs», Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences
E-mail: nizinata@yandex.ru

Kochetkov Sergei Nikolayevich,
Postgraduate of the department «Building
designs»
E-mail: ser.ko@mail.ru

Ponomarev Andrey Nikolayevich,
Candidate of Sciences, Professor, General
Director of CJSC «STC of Applied
Nanotechnologies»
E-mail: 9293522@gmail.ru

Kozeev Alexander Alekseevich,
Senior researcher of the CJSC «STC of Applied
Nanotechnologies»
E-mail: alex.kozeev@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Т.А. Низина, С.Н. Кочетков, А.Н. Пономарев, А.А. Козеев

Приведены результаты исследования эффективности введения модификаторов на основе аддуктов нанокластеров углерода в цементные композиты в зависимости от вида пластифицирующих добавок Melflux (1641 F, 2642 F, 2651 F, 5581 F).

Ключевые слова: цементные композиты, аддукты нанокластеров углерода, суперпластификатор, подвижность, предел прочности при сжатии.

INFLUENCE EFFICIENCY ASSESSMENT OF NANOMODIFIERS ON THE STRENGTH AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES DEPENDING ON THE TYPE OF PLASTICIZING ADDITIVES

T.A. Nizina, S.N. Kochetkov, A.N. Ponomarev, A.A. Kozeev

Results of the investigation of the efficiency of modifiers on the basis of additives of carbon nanocluster in the cement composites depending on the type of plasticizing additives Melflux (1641 F, 2642 F, 2651 F, 5581 F) are given.

Keywords: cement composites; adducts of carbon nanoclusters; superplasticizer; mobility; compressing strength.

Цементные бетоны и растворы широко распространены в современной строительной отрасли. Наряду с ростом объемов производства цементных композитов повышаются и требования к их свойствам. Бетоны должны обладать высокими показателями

телями реологических характеристик в процессе укладки, что обеспечит в дальнейшем высокую скорость набора проектной прочности и ускорит возведение зданий и сооружений.

С целью повышения технологических и эксплуатационных характеристик цементных растворов и бетонов используются различные методы их модификации. В последние годы широкое распространение для повышения реологических характеристик цементных бетонов получили пластификаторы на поликарбоксилатной основе, обладающие чрезвычайно высокой пластифицирующей способностью. Однако применение данных модификаторов, если учесть их высокую стоимость, приводит к значительному росту цен на готовую продукцию. Поэтому одной из актуальных задач современного материаловедения является поиск возможностей снижения концентраций дорогих поликарбоксилатных пластификаторов с учетом достижения требуемых прочностных и реологических характеристик.

Как показали результаты проведенных авторами исследований [1, 2], решение данной задачи может быть осуществлено за счет модификации пластификаторов нанодобавками, позволяющей переводить их из «супер» в гиперпластификаторы. В качестве наномодификаторов были использованы водорастворимые аддукты нанокластеров углерода (АНКУ), разработанные компанией ЗАО «НТЦ Прикладных Нанотехнологий» (г. Санкт-Петербург).

Исследования проводились на портландцементе (ЦЕМ I 42,5Б), выпускаемом компанией ОАО «Мордовцемент». В ходе работы были использованы 4 вида поликарбоксилатных пластификаторов торговой марки Melflux (1641 F, 2642 F, 2651 F, 5581 F) производства немецкой фирмы BASF Construction Polymers GmbH, а также нафталинформальдегидный пластификатор «Супранафт». Концентрация пластификаторов принималась в диапазоне от 0 до 0,6 % от массы цемента; концентрация АНКУ не превышала 6 % от массы пластификатора (0,006 % от массы цемента); водоцементное отношение варьировалось от 0,27 до 0,29. Исследования проводились с помощью математических методов планирования эксперимента. План исследований для одного вида пластификатора представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования и план эксперимента в нормализованных факторах

Номер опыта	Варьируемые факторы					
	В кодовых величинах			В нормализованных факторах		
	x_1	x_2	x_3	В/Ц	Пластификатор	АНКУ
1	+1	+1	+1	0,29	0,6	0,006
2	-1	+1	+1	0,25	0,6	0,006
3	+1	-1	+1	0,29	0	0,006
4	-1	-1	+1	0,25	0	0,006
5	+1	+1	-1	0,29	0,6	0
6	-1	+1	-1	0,25	0,6	0
7	+1	-1	-1	0,29	0	0
8	-1	-1	-1	0,25	0	0
9	-1	0	0	0,25	0,3	0,003
10	+1	0	0	0,29	0,3	0,003
11	0	0	0	0,27	0,3	0,003
12	0	-1	0	0,27	0	0,003
13	0	+1	0	0,27	0,6	0,003
14	0	0	+1	0,27	0,3	0,006
15	0	0	-1	0,27	0,3	0

Пластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров имеют структуру привитого сополимера, состоящую из основной цепи и нанизанных на неё боковых ответвлений (рис. 1). Действие пластификаторов Melflux основано на совокупности

электростатического и стерического (пространственного) эффектов. Сферический эффект достигается с помощью боковых гидрофобных полиэфирных цепей молекулы поликарбоксилатного эфира, что и объясняет более сильное и продолжительное водоредуцирующее и пластифицирующее действие данных пластификаторов [3].

В зависимости от условий синтеза получают поликарбоксилаты с различными длинами боковых полиэфирных цепочек и с разной плотностью заряда, что позволяет создавать материалы с разным соотношением стерического эффекта и анионной активности (см. рис. 1). При этом уменьшение замедляющего эффекта, характерного для поликарбоксилатных пластификаторов, связывают с изменением соотношения длин основной цепи и боковых ответвлений. Увеличение длин боковых цепочек и сокращение основной приводит к уменьшению плотности адсорбции ПАВ на поверхности зерна вяжущего, что позволяет сохранить часть активных центров от перекрытия плёнками полимера.

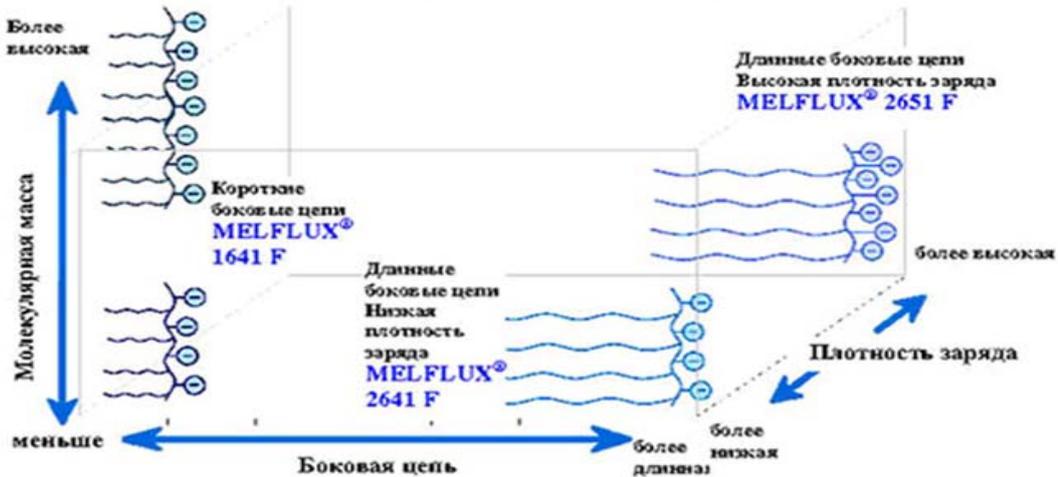


Рис. 1. Типы поликарбоксилатных пластификаторов [3]

Выбор данных наименований торговых марок поликарбоксилатных пластификаторов вызван различиями основных свойств и особенностями их применения для разнообразных систем на основе портландцементов (табл. 2). Представленные в работе [3] выводы свидетельствуют о целесообразности применения при позднем разжижении смесей пластификаторов с более высоким зарядом, в частности Melflux 2651 F и Melflux 5581 F. В случае быстрого падения подвижности раствора во времени рекомендуется использовать менее анионоактивные пластификаторы Melflux 1641 F и Melflux 2641 F.

Т а б л и ц а 2

Особенности применения поликарбоксилатных эфиров торговой марки Melflux производства немецкой фирмы BASF Construction Polymers GmbH [3]

Торговая марка	Основные свойства			Системы					
	Диспергирующий (пластифицирующий) эффект	Низкая дозировка	Отсутствие замедления	Щ-система, богатая K^+ , Na^+ , SO_4^{2-}	Щ-система, бедная K^+ , Na^+ , SO_4^{2-}	Содержит микросилику	Возможность применения с лимонной кислотой	Короткое время растворения	Замедляющий эффект
Melflux 1641 F	x	x			xx				x
Melflux 2641 F	x	x	xx		xx				
Melflux 2651 F	xx	xx	xx	xx	x	x	xx	x	
Melflux 5581 F	xx	xxx	xx	xxx	x	x	x	x	

Учитывая, что водорастворимые аддукты нанокластеров углерода позволяют получать устойчивые водные растворы, их введение в состав цементных композитов осуществляли в следующем порядке: предварительное растворение наномодификатора в воде (1 г/л); совмещение полученного состава с раствором пластификатора; введение полученного раствора в цементные композиты.

Анализ изменения реологических характеристик проводился по расплыву цементного теста. Установлено, что наибольшее пластифицирующее воздействие используемых поликарбоксилатных пластификаторов Melflux (1641 F, 2642 F, 2651 F, 5581 F) наблюдается при введении их в состав ЦК в интервале 0,3...0,6 % от массы цемента (рис. 2). Значения максимальных абсолютных величин расплыва цементного теста и его прироста при В/Ц-отношении, равном 0,27...0,29, в зависимости от концентрации пластификаторов представлены в табл. 3. Установлено, введение 0,6 % пластификаторов Melflux в зависимости от используемой марки позволяет повысить расплыв теста с 6,55 до 32,95...36,5 см (на 403,05...457,25 %), что подтверждает высокую пластифицирующую способность поликарбоксилатных эфиров по сравнению с нафталинформальдегидными пластификаторами, в частности пластификатором «Супранафт», максимальный прирост расплыва которого составляет всего 87,02 %.

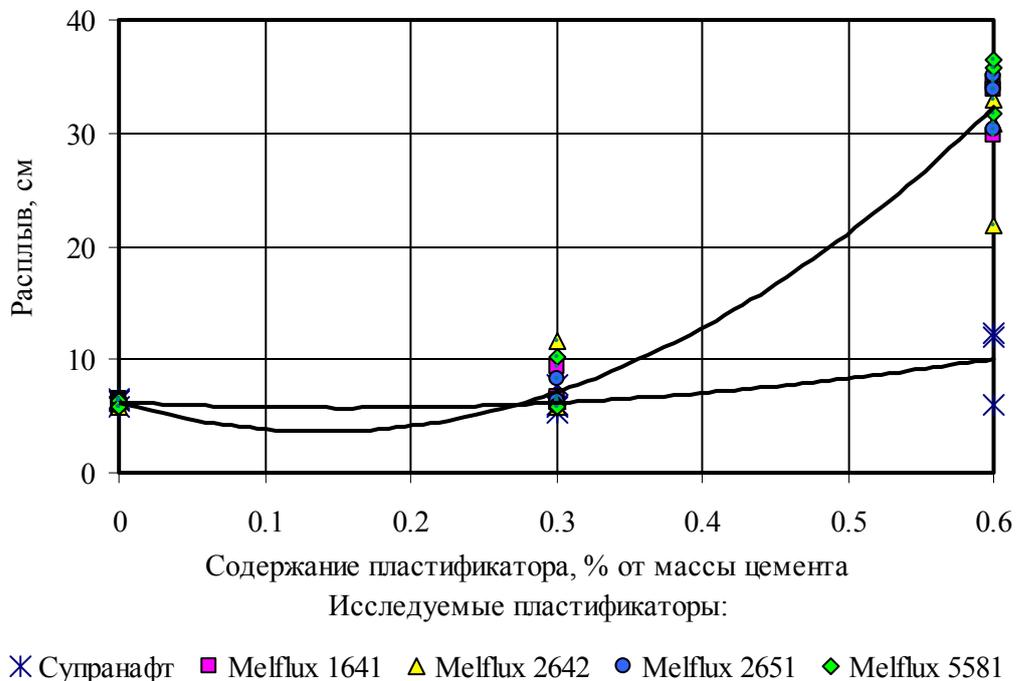


Рис. 2. Изменение расплыва цементных композитов в зависимости от вида и концентрации исследуемых пластификаторов

Т а б л и ц а 3

Марка пластификатора	Максимальная величина расплыва (см) при концентрации пластификатора, % от массы цемента			Максимальный прирост расплыва (%) в интервале концентраций пластификаторов (%)		
	0	0,3	0,6	0...0,3	0,3...0,6	0...0,6
Супранафт	6,55	7,80	12,25	19,08	57,05	87,02
Melflux 1641 F		9,33	34,50	42,37	269,97	426,72
Melflux 2641 F		11,55	32,95	76,33	185,281	403,05
Melflux 2651 F		8,25	35,00	25,95	324,24	434,35
Melflux 5581 F		10,18	36,50	55,34	258,72	457,25

Оценку эффективности введения АНКУ проводили на основе анализа прироста расплыва цементного теста, определяемого как отношение величины расплыва состава

с модификатором к значению, полученному для состава без модификатора при том же расходе пластификатора и В/Ц-отношении (рис. 3). Установлено, что максимальный эффект от введения нанодобавки при использовании пластификатора «Супранафт» на нафталиноформальдегидной основе, составляющий 22 % (В/Ц=0,27), наблюдается при максимальном содержании АНКУ (0,006 % от массы цемента). С уменьшением расхода пластификатора прирост распыла за счет наномодификации повышается (рис. 3, а).

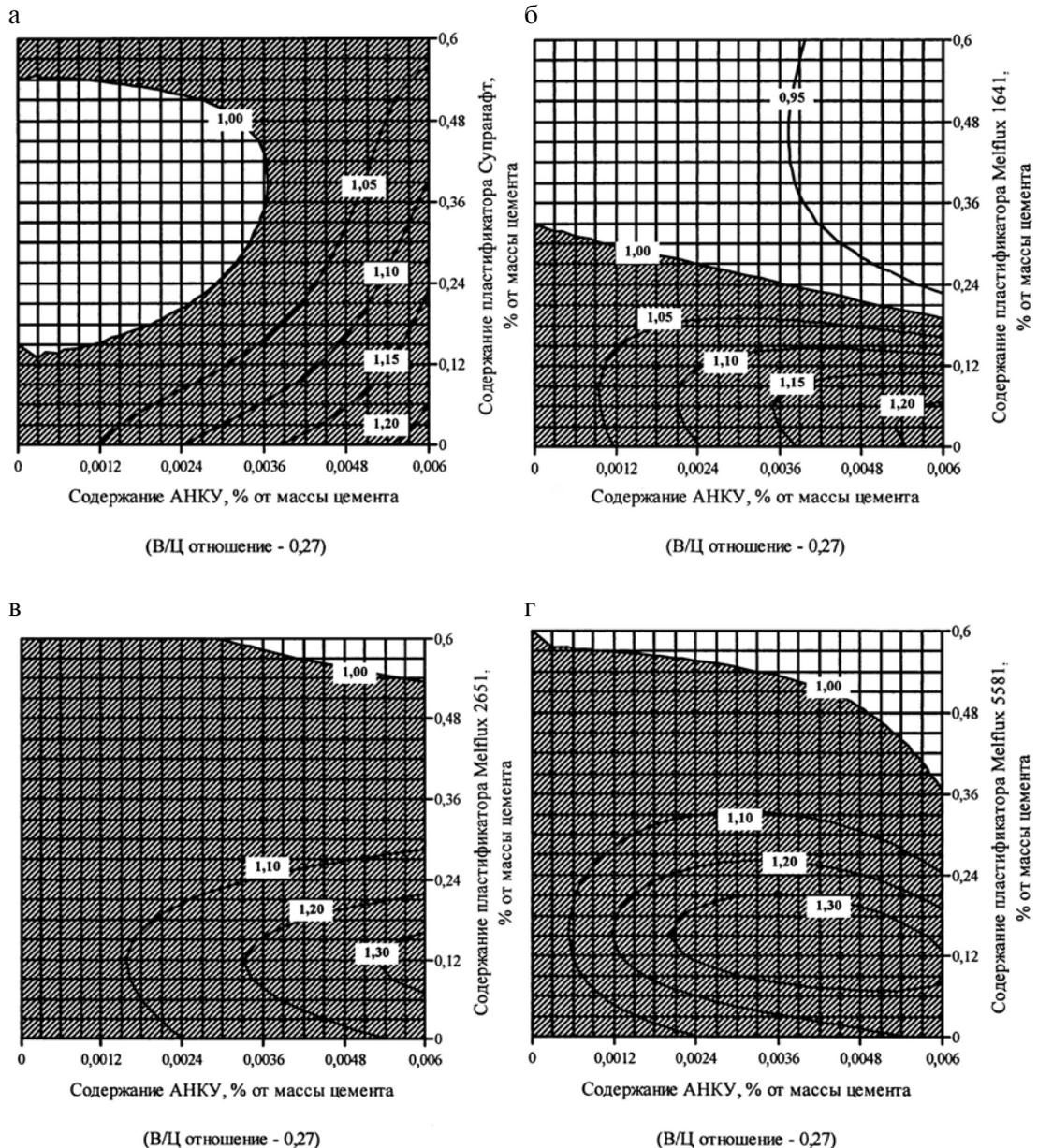


Рис. 3. Максимальный прирост распыла цементного теста (отн.ед.), модифицированного аддуктами нанокластеров углерода в присутствии пластификаторов (В/Ц=0,27): а – Супранафт; б – Melflux 1641 F; в – Melflux 2651 F; г – Melflux 5581 F

Для поликарбоксилатных пластификаторов максимальный эффект от введения АНКУ при В/Ц-отношении 0,27 варьируется в зависимости от марки от 21 до 39 % (рис. 3, б–г). При повышении В/Ц-отношения до 0,29 эффективность совместного введения нанодобавки и всех видов исследуемых пластификаторов снижается и не превышает 5...10 %.

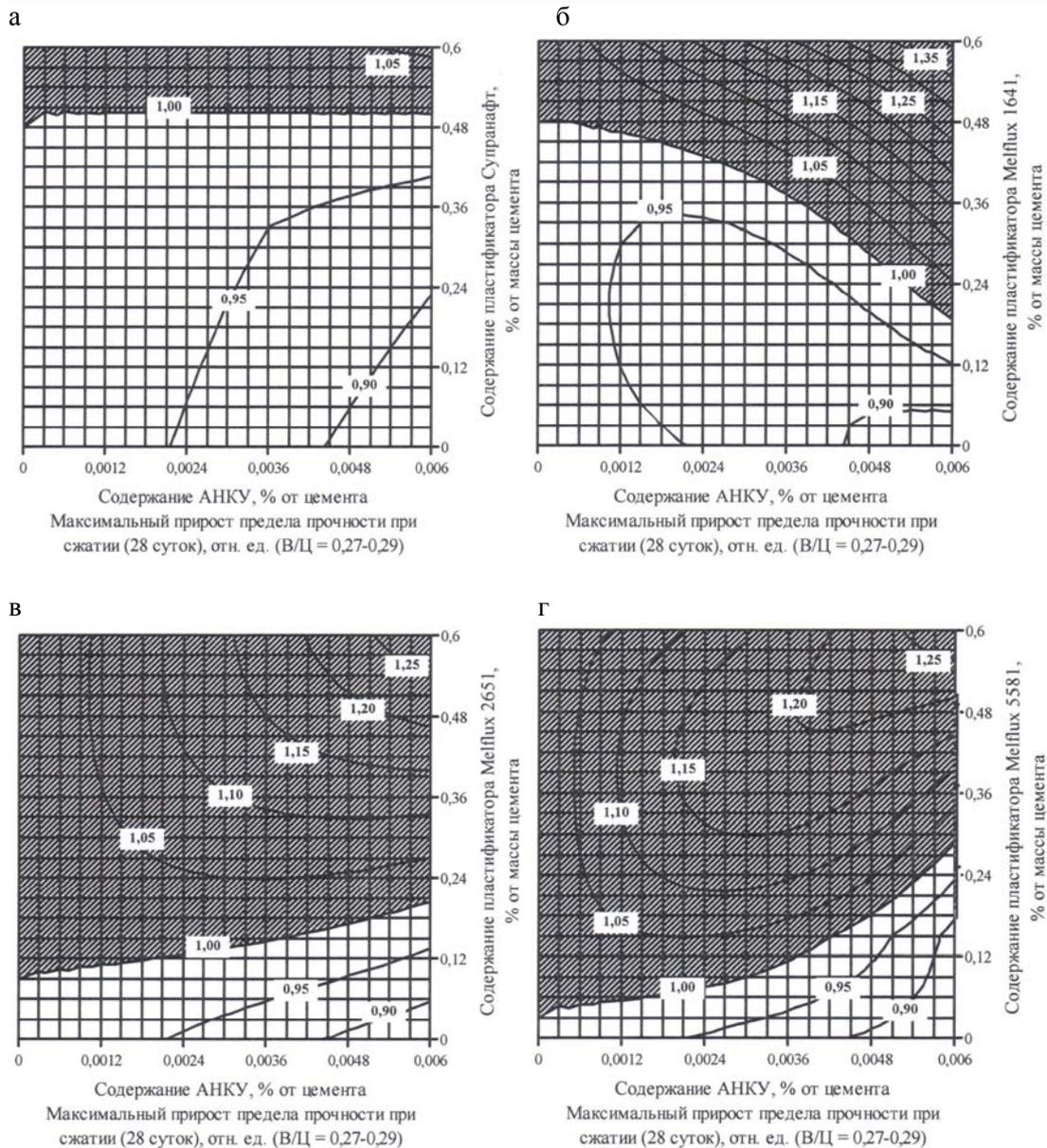


Рис. 4. Максимальный прирост предела прочности при сжатии (28 суток) цементных композитов (отн.ед.), модифицированных аддуктами нанокластеров углерода в присутствии пластификаторов (В/Ц=0,27...0,29):
 а – Супранафт; б – Melflux 1641 F; в – Melflux 2651 F; г – Melflux 5581 F

Анализ влияния наномодифицирования на прочностные показатели цементных композитов показал возможность существенного повышения предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток при комплексном использовании АНКУ и поликарбоксилатных пластификаторов. Максимальный эффект, составляющий 41 %, достигается при применении пластификатора Melflux 1641 F (рис. 4, б). Для добавок Melflux 2651 F и Melflux 5581 F зафиксирован прирост предела прочности при сжатии до 29 % (рис. 4, в, г). Наибольшее увеличение прочностных характеристик во всех случаях наблюдается при повышении концентрации АНКУ и поликарбоксилатных пластификаторов. Для составов с пластификатором «Супранафт» максимальный прирост предела прочности при сжатии достигает 6 % (рис. 4, а).

Анализ полученных результатов показал, что из 5 исследованных видов пластифицирующих добавок наибольший эффект от наномодификации наблюдается при использовании пластификатора Melflux 1641 F – значения расплыва цементного теста и предела прочности при сжатии повышаются соответственно до 21 и 41 %. Для выяв-

ления наиболее оптимальных концентраций АНКУ, позволяющих сократить расход дорогих поликарбоксилатных пластификаторов, в частности Melflux 1641 F, необходимы дополнительные исследования и оптимизация разрабатываемых составов.

Список литературы

1. Пономарев, А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. – СПб., 2009. – №6(8). – С. 25–33.
2. Низина, Т.А. Результаты экспериментальных исследований цементных композитов, модифицированных водорастворимыми аддуктами нанокластеров углерода / Т.А. Низина, А.Н. Пономарев, С.Н. Кочетков, А.А. Козеев // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2011. – Вып. 14. – С. 117–120.
3. Василик, П.Г. Применение гиперпластификаторов Melflux в сухих строительных смесях / П.Г. Василик, И.В. Голубев, А.Ф. Бурьянов. – Режим доступа: <http://www.chem.eurohim.ru>.

References

1. Ponomarev, A.N. High-quality concrete. Analysis of the opportunities and the practice of using nanotechnology techniques // Civil Engineering Journal. – St., 2009. – № 6 (8). – P. 25–33.
2. Nizina, T.A. Results of experimental studies of cement composites, modified water-soluble adducts of carbon nanoclusters / T. A.Nizina, A.N. Ponomarev, S.N. Kochetkov, A.A. Kozeev // Bulletin of the Volga regional branch RAASN. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2011. – № 14. – P. 117–120.
3. Wasylyk, P.G. The use of hyperplasticizers Melflux in the dry construction mixtures / P.G. Wasylyk, I.V. Golubev, A.F. Buriyanov. – Access regime: <http://www.chem.eurohim.ru>.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Гаврилов Михаил Александрович,
старший преподаватель кафедры
«Начертательная геометрия и графика»
E-mail: gavrillov79@inbox.ru

Вернигорова Вера Никифоровна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Gavrilov Mikhail Aleksandrovich,
Senior lecturer of the department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: gavrillov79@inbox.ru

Vernigorova Vera Nikiforovna,
Doctor of Science in Chemistry, Professor
of the department «Construction Materials
Technology and Wood Processing»

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

М.А. Гаврилов, В.Н. Вернигорова

Приводятся результаты исследований внутрисистемного взаимодействия компонентов эпоксидных композитов на основе асбестосодержащих отходов производства. Установлено, что предлагаемые материалы обладают не только высокими показателями физико-механических и эксплуатационных свойств, но и пониженной биологической активностью.

Ключевые слова: эпоксидные композиты, асбест, ИК-спектроскопия.

EPOXY-RESIN BASED COMPOSITE MATERIALS

M.A. Gavrilov, V.N. Vernigorova

The article given presents the results of research of interaction between components of epoxy composites formed upon asbestos-containing industrial waste. It has been determined that such composites not only have high degrees of physical and mechanical properties, but also low biological activity values.

Keywords: epoxy composites, asbestos, IR-spectroscopy.

Развитие строительной индустрии требует разработки и внедрения высокоэффективных и коррозионностойких строительных материалов, к которым относятся и полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе различных синтетических связующих и их модификации (эпоксидные смолы, фурфуролацетоновые, поливинилацетатные связующие).

Для регулирования прочностных и деформационных показателей в составы химически стойких композитов вводится тонкодисперсный армирующий материал. В качестве таких модификаторов используются два вида подобных материалов: волокнистые отходы некоторых предприятий республики Мордовии (ВОХП) и тонкодисперсные отходы строительного производства Пензенской области (ТДОСП, шифер). В состав предлагаемых для модификации отходов входит хризотил-асбест, портландцемент и кварц. Хризотил-асбест – $Mg_6(OH)_8[Si_4O_{10}]$ – волокнистый материал группы серпентина. При прогнозировании свойств хризотил-асбеста, в том числе биологической активности и канцерогенности, необходимо учитывать как первоначальные характеристики, так и их изменения под воздействием различных факторов. В настоящее время признано, что хризотил-асбест существенно менее опасен в использовании по сравнению с амфиболовыми асбестами (крокидолит, тремолит и др.) [1]. Более того, выдвинуто предположение, что свойства хризотил-асбеста в присутствии продуктов гидратации портландцемента, входящего в состав шифера, меняются в сторону уменьшения биологической активности [2]. В данной работе приведены результаты

исследования механизма взаимодействия компонентов эпоксидных композитов на основе асбестосодержащих наполнителей.

Экспериментально установлено [3], что разрабатываемые композиционные материалы обладают достаточными для химически стойких защитных материалов значениями физико-механических свойств. Предложенные в качестве наполнителя эпоксидных композитов отходы производства с кислотостойкими и армирующими свойствами повышают их коррозионную стойкость в кислотах на 40–70 %. Однако задача снижения прогнозируемой канцерогенности материалов на основе хризотил-асбестовых волокон остается актуальной [4].

Для изучения механизма взаимодействия эпоксидной смолы ЭД-20 с наполнителями хризотил-асбестом, серпентинитом и шифером использовался метод инфракрасной (ИК) спектроскопии. ИК-спектры эпоксидной смолы ЭД-20, хризотил-асбеста, серпентинита, шифера и образцов композиционных материалов на основе ЭД-20 и перечисленных наполнителей снимались на ИК-спектрофотометре марки ИКС-40 в диапазоне длин волн 4000–400 см⁻¹.

Установлено, что на ИК-спектрах всех образцов наблюдаются полосы поглощения смолы ЭД-20 при 825,43–826 см⁻¹ – δ -колебания паразамещенного бензольного кольца. Полоса колебаний концевых групп при 920 см⁻¹ в композиционных материалах с наполнителем хризотил-асбестом, серпентинитом и шифером отсутствует. На ИК-спектрах всех композиционных материалов отсутствует полоса поглощения валентных ν_S -колебаний связи С-О в алифатической части макромолекулы ЭД-20. Полоса поглощения при 1250 см⁻¹ обусловлена валентными колебаниями связи С-О в ароматической части композита с наполнителем шифером. В композитах с серпентинитом и хризотил-асбестом эта полоса сместилась в сторону меньших длин волн, то есть больших частот колебаний (полосы при 1299,96 см⁻¹ и 1296,00 см⁻¹ соответственно). Слабая полоса деформационных колебаний δ -связи С-ОН присутствует только в ИК-спектре композита с серпентинитом. На ИК-спектрах композитов с хризотил-асбестом и шифером наблюдается серия линий в интервале длин волн 1434,86–1461,86 см⁻¹ и 1419,43–1465,72 см⁻¹ соответственно, что обусловлено δ -колебаниями СН₃-групп. В композите с наполнителем серпентинитом наблюдается только одна полоса поглощения при 1458 см⁻¹ – δ -колебания СН₃-групп. На ИК-спектрах образцов всех композиционных материалов наблюдаются интенсивные полосы поглощения пульсационных колебаний бензольных колец при 1512,01 см⁻¹, 1612,29 см⁻¹ (с хризотил-асбестом); при 1504,29–1512,01 см⁻¹, 1608,43 см⁻¹ (с серпентинитом); при 1512,01 см⁻¹ и 1612,29 см⁻¹ (с шифером). Эти полосы поглощения в ИК-спектрах композитов не изменились. На ИК-спектре композита с хризотил-асбестом наблюдается среднеслабой интенсивности полоса поглощения при 1581,43 см⁻¹, обусловленная колебаниями ароматического кольца. На ИК-спектре композита с серпентинитом эта полоса очень слабая. На ИК-спектре композита с наполнителем шифером эта полоса смещена в сторону уменьшения частоты колебаний ароматического кольца до 1558,29 см⁻¹. На крыле полосы поглощения при 1612,29 см⁻¹, 1608,43 см⁻¹ всех ИК-спектров наблюдаются слабые полосы поглощения при 1658,58 см⁻¹, 1643,15 см⁻¹, обусловленные деформационными колебаниями ОН-групп и аминогрупп NH. На ИК-спектре композита с наполнителем хризотил-асбестом очень слабы полосы поглощения при 1708,72 см⁻¹, 1797,43 см⁻¹ и при 1886,15 см⁻¹. Можно предположить, что эти полосы отражают валентные колебания вновь образовавшихся химических связей типа С=О при взаимодействии макромолекул ЭД-20 с двухслойным неокислородным мотивом хризотил-асбеста.

На ИК-спектрах образцов композита с хризотил-асбестом (рис. 1) наблюдается широкая средней интенсивности полоса поглощения в интервале длин волн 2823,44 см⁻¹–2939,15 см⁻¹, обусловленная, очевидно, валентными ν_S -колебаниями С-Н связей в метильных группах СН₃. Полосы поглощения при 2823,44 см⁻¹ и 2881,30 см⁻¹ в композите отражают ν_S -колебания связи С-Н в метильных группах смолы ЭД-20. Пик при 2823,44 см⁻¹ смещен в сторону больших длин волн, то есть в сторону уменьшения частот колебаний. Это указывает на взаимодействие групп СН₃ с хризотил-асбестом. Максимумы при 2916,01 см⁻¹ и 2939,15 см⁻¹ отражают антисимметричные колебания

ν_{GS} -связи С-Н в метиленовых группах. В композите с наполнителем серпентинитом рассмотренная полоса поглощения более интенсивна. Это связано с тем, что в отличие от хризотил-асбеста в структуре серпентинита кремнекислородные тетраэдры образуют только один слой, и связь CH_3 -групп осуществляется с меньшим количеством атомов кислорода кремнекислородного слоя.

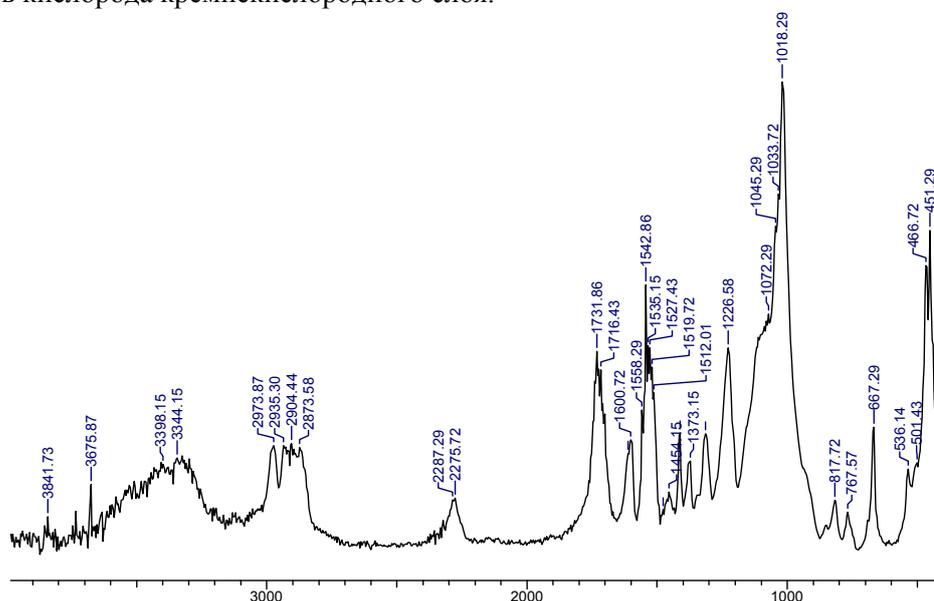


Рис. 1. ИК-спектр образцов композита, наполненного хризотил-асбестом

На ИК-спектрах образцов композита с шифером (рис. 2) расщепленная на несколько компонент полоса поглощения в интервале длин волн $2815,72\text{--}2970,01\text{ см}^{-1}$ менее интенсивна по сравнению с таковыми полосами поглощения на ИК-спектрах композитов с хризотил-асбестом и серпентинитом. Структура шифера включает хризотил-асбест, гидросиликаты кальция и другие гидратированные новообразования, вследствие чего на поверхности и в приповерхностном слое образцов с наполнителем шифером наблюдается большое разнообразие активных центров, например, атомы Si^{4+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , O^{2-} , OH , H_2O , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Cl , F и др., поэтому связь группы CH_3 -групп возможна с атомами Si^{4+} , Al^{3+} , O^{2-} , Fe^{3+} и др. Эти связи уменьшают интенсивность колебаний CH_3 -групп ЭД-20.

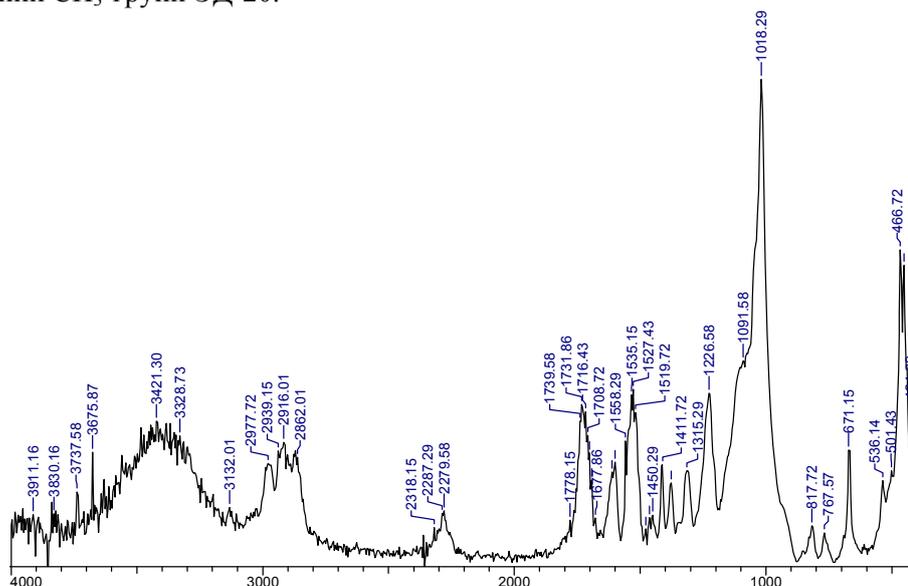


Рис. 2. ИК-спектр образцов композита, наполненного молотым шифером

В высокочастотной протонно-кислородной области ИК-спектров образцов всех композитов наблюдается широкая, расщепленная на несколько компонент полоса поглощения в интервале длин волн $3047,15\text{ см}^{-1}$ – $3645,01\text{ см}^{-1}$. Однако интенсивность этих полос разная. Наиболее интенсивная полоса наблюдается у ИК-спектров образцов композита с наполнителем – шифером. В названном интервале частот колебаний находятся линии валентных ν_S -колебаний ОН-групп, молекул воды и аминогрупп NH. Следовательно, в образцах композита с наполнителем шифером перечисленные группы более прочно связаны через атомы кислорода и азота с другими группировками гидросиликатов кальция шифера.

На ИК-спектрах образцов композита с наполнителем хризотил-асбестом наблюдаются следующие полосы поглощения: при $3305,58\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями группы ν_S группы NH (свободные группы); $3344,15\text{ см}^{-1}$ – полоса поглощения отражает ν_S -колебания связанных аминогрупп NH; при $3421,30\text{ см}^{-1}$ – валентные колебания скоординированных вокруг катионов молекул воды; очень слабый максимум при $3826,30\text{ см}^{-1}$ отражает суммарные колебания разных функциональных групп.

На ИК-спектре образцов композита с наполнителем-серпентинитом (рис. 3) в высокочастотной области спектра наблюдается очень слабый максимум при $3120,44\text{ см}^{-1}$, обусловленный ν_S -колебаниями связи С-Н в бензольном ядре; слабый максимум при $3290,15\text{ см}^{-1}$ отражает ν_S -колебания аминогрупп аминного отвердителя; максимум смещен в сторону меньших частот колебаний вследствие частичного связывания этих групп с катионами октаэдрической части структуры серпентинита. Максимум при $3398,15\text{ см}^{-1}$ – валентные колебания ν_S скоординированных вокруг катионов молекул воды. Очень слабый максимум при $3841,73\text{ см}^{-1}$ отражает суммарные колебания разных функциональных групп. Высокочастотная протонно-кислородная область ИК-спектра образца композита с наполнителем шифером расщеплена в наибольшей степени. Слабый максимум при $3047,15\text{ см}^{-1}$ обусловлен валентными колебаниями связанных водородной связью ОН-групп с другими группировками структуры, например, с аминогруппами аминного отвердителя. Максимум при $3143,58\text{ см}^{-1}$ обусловлен валентными ν_S -колебаниями связи С-Н в бензольном ядре; максимум немного смещен в сторону больших частот колебаний. $3336,44\text{ см}^{-1}$ – максимум асимметричных валентных колебаний ν_{GS} связанных аминогрупп отвердителя; $3417,44\text{ см}^{-1}$ – максимум ν_S -колебаний молекул воды, скоординированных вокруг катионов.

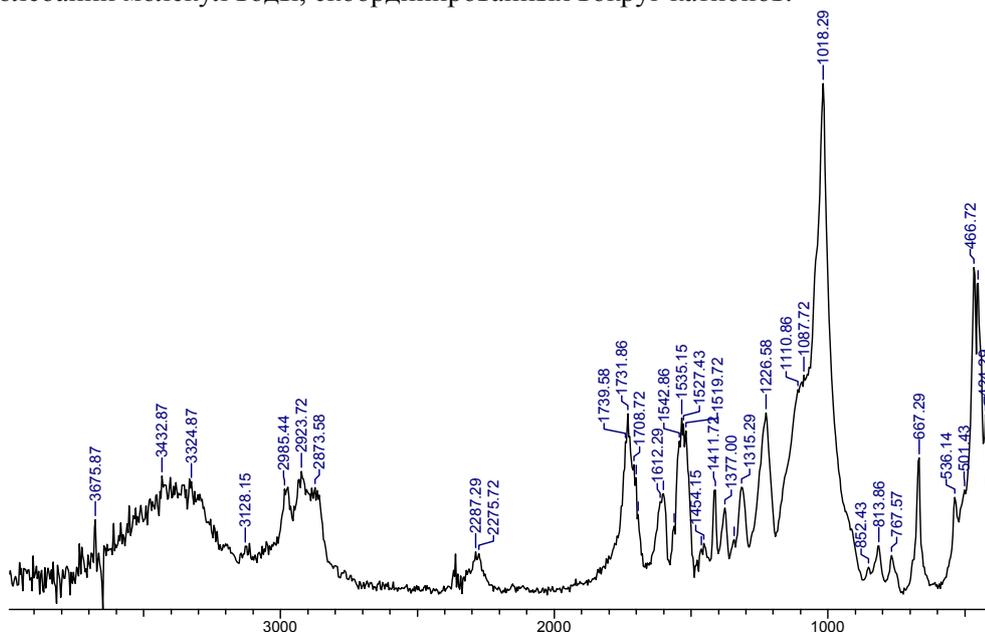


Рис. 3. ИК-спектр образцов композита, наполненного серпентинитом

Валентные колебания свободных аминогрупп наблюдаются при $3448,30\text{ см}^{-1}$. Максимум при $3552,44\text{ см}^{-1}$ обусловлен колебаниями гидроксильных групп, связанных между собой водородными связями, максимум же при $3587,16\text{ см}^{-1}$ и 3645 см^{-1} обу-

словлены валентными ν_s -колебаниями абсорбированных на поверхности гидроксильных групп, связанных между собой водородной связью разной силы. Очень слабые максимумы при $3749,16 \text{ см}^{-1}$ и $3837,87 \text{ см}^{-1}$ отражают валентные ν_s -колебания свободных гидроксильных групп.

В низкочастотной области ИК-спектров образцов всех композитов в интервале длин волн $435,86\text{--}767,57 \text{ см}^{-1}$ наблюдаются среднеслабые и слабые полосы поглощения, которые можно отнести к колебаниям связей Si-O-Mg, Si-O, Si-O-Si. Именно в этой части ИК-спектров наблюдаются изменения. Так, на ИК-спектрах образцов композита с наполнителем хризотил-асбестом в этой области наблюдаются следующие максимумы: при $439,72 \text{ см}^{-1}$ – деформационные δ -колебания связи Si-O-Mg; при $455,15 \text{ см}^{-1}$ – валентные ν_s -колебания связи Si-O-Mg; при $601,72 \text{ см}^{-1}$ – деформационные колебания связи Si-O; максимум смещен в сторону меньших частот колебаний, что указывает на взаимодействие атомов кислорода этой связи с –СН и СН₂-группами эпоксидной смолы. Слабый максимум при $709,72 \text{ см}^{-1}$ отражает валентные ν_s -колебания связи Si-O; относительная интенсивность максимума деформационных колебаний связи Si-O в ортосиликатном мотиве при $875,57 \text{ см}^{-1}$ уменьшилась. Это указывает на взаимодействие тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$ с –СН и –СН₂ группами эпоксидной смолы. Изменения: характерный максимум валентных ν_s -колебаний связи Si-O-Mg при $478,14 \text{ см}^{-1}$ отсутствует. Появились новые максимумы при $555,43 \text{ см}^{-1}$ (средне-слабый); при $756,00 \text{ см}^{-1}$ и при $763,72 \text{ см}^{-1}$. Новые максимумы позволяют утверждать, что атомы кислорода и атомы водорода слоистого кремнекислородного мотива хризотил-асбеста взаимодействуют с функциональными группами эпоксидной смолы и аминного отвердителя.

На ИК-спектрах образцов композита с наполнителем серпентинитом в низкочастотной области спектра наблюдается меньше максимумов, чем на ИК-спектрах с хризотил-асбестом. Слабый максимум при $462,86 \text{ см}^{-1}$ отражает валентные ν_s -колебания связи Si-O-Mg. Среднесильный максимум при $555,29 \text{ см}^{-1}$ обусловлен не только деформационными колебаниями связи Si-O, но и взаимодействием этой связи с функциональными группами ЭД-20 и аминного отвердителя. Появились новые пики при $729\text{--}736 \text{ см}^{-1}$ и при $767,57 \text{ см}^{-1}$. Слабый максимум при $948,86 \text{ см}^{-1}$ отражает валентные ν_s -колебания связи Si-O в ортосиликатном мотиве.

На ИК-спектрах образцов композитов с наполнителем шифером в низкочастотной области наблюдаются следующие полосы поглощения: $435,86 \text{ см}^{-1}$ – деформационные δ -колебания связи Si-O-Mg; максимумы в интервале $443,57\text{--}482,14 \text{ см}^{-1}$ обусловлены валентными колебаниями связи Si-O-Mg; на ИК-спектрах образцов в этой области спектра наблюдаются два новых максимума при $559,29 \text{ см}^{-1}$ и $713,57 \text{ см}^{-1}$. Максимум деформационных δ -колебаний связи С-Н в ароматическом ядре остался без изменения. Максимум при $875,57 \text{ см}^{-1}$ – деформационные колебания связи Si-O в ортосиликатном мотиве. На ИК-спектре отсутствуют максимумы скелетных колебаний эпоксидных колец при $914\text{--}916 \text{ см}^{-1}$. Средней интенсивности максимумы при $956,57 \text{ см}^{-1}$ и $979,72 \text{ см}^{-1}$ обусловлены валентными ν_s -колебаниями связи Si-O в тетраэдрах $[\text{SiO}_4]^{4-}$, максимумы $1014,43 \text{ см}^{-1}$ и $1087,72 \text{ см}^{-1}$ отражают валентные ν_s -колебания С-О в цепочках; максимум при $1033,72 \text{ см}^{-1}$ отражает валентные ν_s -колебания С-О в алифатической части. Максимум при $1107,00 \text{ см}^{-1}$ обусловлен валентными ν_s -колебаниями связи Si-O в кремнекислородных слоях, максимум смещен в сторону больших длин волн, то есть в сторону меньших частот колебаний, что указывает на связь этой Si-O связи с СН- и СН₂-группами или с ОН-группами смолы и аминного отвердителя. Максимум среднесильный при 1180 см^{-1} обусловлен валентными ν_s -колебаниями в кремнекислородных слоях, возможно, связанных с функциональными группами смолы ЭД-20. На ИК-спектрах образцов композитов с наполнителем хризотил-асбестом также наблюдаются максимумы ν_s -колебаний связи Si-O в кремнекислородных мотивах разной степени конденсации: при $1010,57\text{--}1026,00 \text{ см}^{-1}$ – валентные колебания связи Si-O в цепочках; максимум смещен в сторону больших длин волн, что указывает на связь кремнекислородных цепочек с функциональными группами смолы ЭД-20. Среднесильной интенсивности максимум при $1180,29 \text{ см}^{-1}$ принадлежит колебаниям связи Si-O в кремнекислородных слоях, не связанных с ЭД-20. На ИК-спектрах композитов с наполнителем серпентинитом наблюдаются точно такие же максимумы, с одним отличием – наблюдается максимум при $1122,43 \text{ см}^{-1}$,

обусловленный валентными ν_s -колебаниями связи Si-O в кремнекислородных слоях, связанных с функциональными группами смолы ЭД-20.

На ИК-спектрах образцов всех композитов смещения максимума при 1246–1250 см^{-1} валентных колебаний связи C-O в ароматической части не произошло, но относительная интенсивность максимума разная. С наполнителями асбестом и шифером она одинакова и меньше, чем с наполнителем серпентинитом. Следовательно, конденсированная структура хризотил-асбеста оказывает незначительное поляризующее действие на бензольные кольца смолы ЭД-20, а, значит, и на связь C-O по сравнению с серпентинитом.

На ИК-спектрах образцов всех композитов появился новый максимум при 1296 – 1299 см^{-1} . Максимум обусловлен валентными колебаниями связи Si-O в конденсированном трехмерном кремнекислородном мотиве. В тетраэдре $[\text{SiO}_4]^{4-}$ имеется 4 связи Si-O. Если на тетраэдр не оказывается никакого воздействия, то все четыре связи колеблются, как одна, то есть они вырождены. Деформация тетраэдра $[\text{SiO}_4]^{4-}$ под воздействием других группировок структуры снимает вырождение, и в ИК-спектре появляются полосы поглощения валентных колебаний всех четырех связей Si-O в тетраэдре. Максимум при 1296–1299,86 см^{-1} отражает колебание ν_1 одной из связей Si-O в тетраэдре. Максимум смещен в сторону увеличения частот колебаний.

Анализ ИК-спектров образцов всех композитов показал, что на ИК-спектрах образцов отсутствуют полосы поглощения скелетных колебаний эпоксидных колец, отсутствует полоса поглощения колебаний концевых эпоксидных групп при 920 см^{-1} . Отсутствует максимум деформационных δ -колебаний связи C-H в метильных группах; отсутствует максимум при 2963–2965 см^{-1} – валентных асимметричных ν_{AS} -колебаний связи C-H в эпоксидных кольцах в ИК-спектрах композитов с наполнителями хризотил-асбестом и серпентинитом. На ИК-спектрах образцов всех композитов отсутствует максимум валентных колебаний связи C-H в эпоксидных кольцах при 3006 см^{-1} ; отсутствуют максимумы валентных ν_s -колебаний связи C=O при 1716–1732 см^{-1} . На ИК-спектрах образцов всех композитов отсутствует максимум валентных ν_s -колебаний связи Si-O-Mg при 478,14 см^{-1} . Наблюдается расщепление интенсивности максимума деформационных колебаний связи C-H в метильных и метиленовых группах при 1465–1411 см^{-1} на три максимума с хризотил-асбестом, два максимума с серпентинитом и пять – с шифером. На ИК-спектрах образцов всех композитов наблюдается расщепление средней интенсивности максимума при 2870–2872 см^{-1} на две компоненты. Средней интенсивности максимум валентных колебаний связи C-H в метиленовых группах при 2930–2936 см^{-1} также расщеплен на две компоненты. Расщепление объясняется нарушением симметрии в окружении данной связи.

Появились новые максимумы при 555,43 см^{-1} , 756,00 см^{-1} , 763,72 см^{-1} с наполнителем хризотил-асбестом, при 729 – 736 см^{-1} с наполнителем серпентинитом и при 559,29 см^{-1} , 713,57 см^{-1} с наполнителем шифером и общий для всех композитов новый максимум при 1296–1299,96 см^{-1} . Пульсационные колебания бензольных ядер практически остались без изменения. Таким образом, реакционно способной частью силикатных наполнителей является область структуры, в которой конденсированные тетраэдры через общие атомы кислорода связаны с магнитоокислородными октаэдрами. Это объясняется неравноценностью связей Si-O-Mg. Связь Si-O более ковалентна, а связь Mg-O более ионна. Связь Si-O более поляризуема, более деформируема.

В структуре композитов наблюдается распределение молекул воды и OH-групп по силе водородных связей, ими образуемых. Наибольшая дифференциация воды и OH-групп наблюдается в композите с шифером, наименьшая – с асбестом, что объясняется многокомпонентностью структуры шифера. В данной структуре присутствуют гидросиликаты кальция, гидроалюминаты кальция, гидроферриты кальция, хризотил-асбест, вода.

Общий вид ИК-спектров всех композитов таков: в высокочастотной области наблюдается несколько типов гидроксильных групп, которые нечетко разделены, отсюда и размытость полосы поглощения в интервале частот 3000–3600 см^{-1} . В низкочастотной области спектров наблюдаются интенсивные четко выраженные довольно узкие максимумы, особенно с серпентинитом. Это означает, что микроструктура композитов более или менее упорядочена. Макроструктура хризотил-асбеста и серпентинита волокнистая. Волокна оказывают упорядочивающее влияние на

структуру композитов, однако упорядочивающего влияния на распределение воды в структуре волокна практически не оказывают.

В эпоксидном кольце имеются изогнутые химические связи. Большая плотность электронных облаков связей в эпоксидном цикле не сосредоточена в области между ядрами атомов углерода и кислорода. Облака каждого из атомов образуют друг с другом угол, равный примерно 104° . Вследствие этого перекрывание электронных облаков атомов углерода и кислорода меньше, чем в обычных связях. Поэтому связи С-О-С ослаблены, вследствие чего атомы аминогрупп отвердителя легко атакуют связь С-О, и кольцо раскрывается.

Отсутствие на ИК-спектрах всех композитов максимума колебаний концевых эпоксидных колец при 920 см^{-1} означает, что все эпоксидные кольца под действием аминного отвердителя раскрываются и вступают в реакции с гидроксильными группами поверхности наполнителей и химическими связями Si-O-Mg. Ароматическое кольцо взаимодействует только с шифером.

Появившийся на ИК-спектрах всех композитов средней интенсивности максимум при $1296\text{--}1299,8\text{ см}^{-1}$ отражает валентные колебания связи Si-CH₃. Максимум смещен в сторону более высоких частот колебаний, что означает, что связь Si-CH₃ ведет себя более или менее автономно.

В итоге установлено, что поверхность частиц наполнителей, представляющих собой силикаты, гидратирована, то есть покрыта прочно связанными с ней гидроксильными группами OH. На поверхности частиц наполнителей появляются органические заместители, которые взаимодействуют с радикалами эпоксидной смолы. Возникают новые связи, а, значит, и новые максимумы на ИК-спектрах, например, при $555,43\text{ см}^{-1}$, $756,00\text{ см}^{-1}$, $763,72\text{ см}^{-1}$ с наполнителем хризотил-асбестом, при $729\text{--}736\text{ см}^{-1}$ с наполнителем серпентинитом и при $559,29\text{ см}^{-1}$, $713,57\text{ см}^{-1}$ с наполнителем шифером. Это позволяет сделать вывод о том, что свойства хризотил-асбеста как наполнителя меняются. В частности, наибольшие изменения происходят в присутствии продуктов гидратации портландцемента, что позволяет прогнозировать снижение биологической активности материала.

Список литературы

1. Пылев, Л.Н. Экспериментальное изучение канцерогенного действия асбеста / Л.Н. Пылев, Л.А. Васильева, Т.Ф. Кулагина // Экспериментальная онкология. – 1982. – № 4. – С. 3–7.
2. Везенцев, А.И. Превращения и изменения свойств хризотил-асбеста под влиянием различных факторов / А.И. Везенцев, С.М. Нейман, Е.А. Гудкова // Строительные материалы. – 2006. – № 6. – С. 104–105.
3. Высоконаполненные эпоксидные композиты на основе отходов производства / В.А. Худяков [и др.] // Строительные материалы. – 2008. – № 12. – С. 67–69.
4. Козлов, Ю.А. Масштабы и перспективы промышленного производства хризотилового асбеста и изделий на его основе / Ю.А., Козлов А.А. Старостин, Ю.И. Глазунов // Строительные материалы. – 2001. – № 5. – С. 7–9.

References

1. Pylyov, L.N. Experimental research of cancerogenic activity of asbestos / L.N. Pylyov, L.A. Vasilyeva, T.F. Kulagina // Experimental Oncology. – 1982. – №4. – P. 3–7.
2. Vezentsev, A.I. Transformations and changes of chrisothyl-asbestos under the influence of various factors / A.I. Vezentsev, S.M. Neiman, E.A. Gudkova // Construction Materials. – 2006. – №6. – P.104–105.
3. Industrial waste-based epoxy composites with high degree of filling / V.A. Hudjakov [etc.] // Construction Materials. – 2008. – №12. – P.67–69.
4. Kozlov, Y.A. Perspectives and degrees of industrial production of chrisothyl-asbestos and asbestos-based materials / Y.A. Kozlov, A.A. Starostin, Y.I. Glazunov // Construction Materials. – 2001. – №5. – P.7–9.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Фокин Георгий Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: fokingeorg@mail.ru

Тетюшева Ольга Васильевна,
кандидат технических наук
E-mail: folim1@mail.ru

Гуськов Антон Сергеевич,
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: GuskovAnton90@yandex.ru

Penza State University of Architecture and Construction

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

Fokin Georgiy Alexandrovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Physics and Chemistry»
E-mail: fokingeorg@mail.ru

Tetyusheva Olga Vasilevna,
Candidate of Sciences
E-mail: folim1@mail.ru

Guskov Anton Sergeevich,
Postgraduate of the department «Physics and
Chemistry»,
E-mail: GuskovAnton90@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ДИСПЕРСНЫЕ СРЕДЫ

Г.А. Фокин, О.В. Тетюшева, А.С. Гуськов

Экспериментально подтверждена эффективность влияния низкочастотных ультразвуковых колебаний на жидкую фазу дисперсных сред. Установлено, что для приготовления суспензий более предпочтительно применение активированной воды вместо обычной, так как усиливается эффект диспергации.

Ключевые слова: вода, дисперсные среды, активация, ультразвуковые колебания.

INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY ULTRASONIC FLUCTUATIONS OF LOW POWER ON DISPERSE ENVIRONMENTS

G.A. Fokin, O.V. Tetyusheva, A.S. Guskov

Efficiency of the influence of low-frequency ultrasonic vibrations on the liquid phase of disperse media is experimentally confirmed. It is established, that application of activated water for preparation of suspensions is preferable in comparison with usual water, as the effect of dispersion increases.

Keywords: water, disperse media, activation, ultrasonic vibrations.

Объем производства и применения строительных материалов и изделий на основе цементного вяжущего постоянно растет, но сокращение запасов традиционных сырьевых и энергетических ресурсов требует постоянного снижения материалоемкости и энергоемкости производства, что, в свою очередь, связано с созданием прогрессивных технологий, обеспечивающих получение композитных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками при минимальных расходах материальных и энергетических средств. Для решения этих задач применялись различные методики получения композитных материалов. В последние годы набирают популярность ультразвуковые методы, которые используют как на стадии формирования структуры материала, так и для обработки воды затворения.

Воздействие ультразвука на химические и физические процессы в жидкостях имеет кавитационный характер и связано обычно с высокими температурами и давлениями в локальных областях [1].

В данной работе исследовалось влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний на воду затворения. Отличительной особенностью работы является то, что нами

применялся метод акустической эмиссии для наблюдения за процессами в жидкой среде, сопровождающими схлопывание кавитационных пузырьков [2]. Источниками акустической эмиссии являются элементы структуры материала, подвергаемые перестройке при локальном изменении поля внутренних напряжений в материале при достаточной скорости этого изменения. Для этой цели применялась установка для обработки воды.

Установка состоит из ультразвукового аппарата «Волна» (модель УЗТА-0,4/22-ОМ), электрические сигналы с которого передаются на пьезоэлектрический преобразователь, помещенный в вентилируемый кожух. Ультразвуковые колебания распространяются в среде через грибовидный металлический вольтовод с диаметром 25 мм. Исследуемой жидкостью наполняется прозрачный сосуд, который помещается в ячейку с основанием из металлических пластин, соединяемых болтами. Такая конструкция позволяет надежно скрепить сосуд и излучатель. Применение прозрачного сосуда обеспечивает не только нейтральность среды, но и проведение визуальных наблюдений за процессами в жидкости.

Рабочий сосуд представляет собой цилиндр из прозрачного полимерного материала диаметром 10 см и высотой 13 см. Емкость заполняется водопроводной водой и помещается в ячейку для обработки жидкости ультразвуком. Водопроводная вода имеет температуру 3 °С, при которой плотность составляет $0,99999 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, что практически равно максимальной плотности воды.

После обработки ультразвуком по заданному режиму сосуд с водой помещается в звукоизоляционную камеру. Толщина стенок звукоизоляции составляет 17 мм. Сверху в крышку камеры вмонтирован датчик низких частот, диапазон которого составляет от 0,1 до 10 кГц. Датчик погружали на глубину 1/2 высоты столба жидкости так, чтобы он не касался стенок емкости (рис. 1). Это необходимо для уменьшения вибрационных и звуковых помех.

На рис.2. представлен характер звукового фона у необработанной воды.

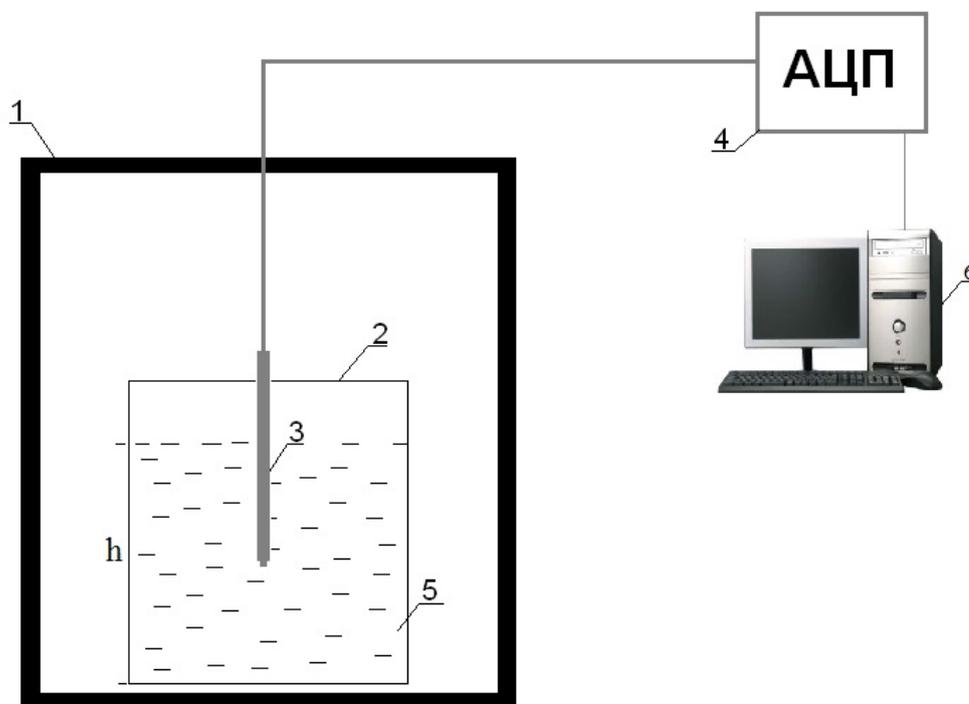


Рис.1. Схема установки для регистрации сигналов:

- 1 – звукоизоляционная камера; 2 – рабочий сосуд; 3 – датчик низких частот; 4 – компьютерный измерительный блок; 5 – обработанная ультразвуком вода; 6 – персональный компьютер;
h – высота столба жидкости

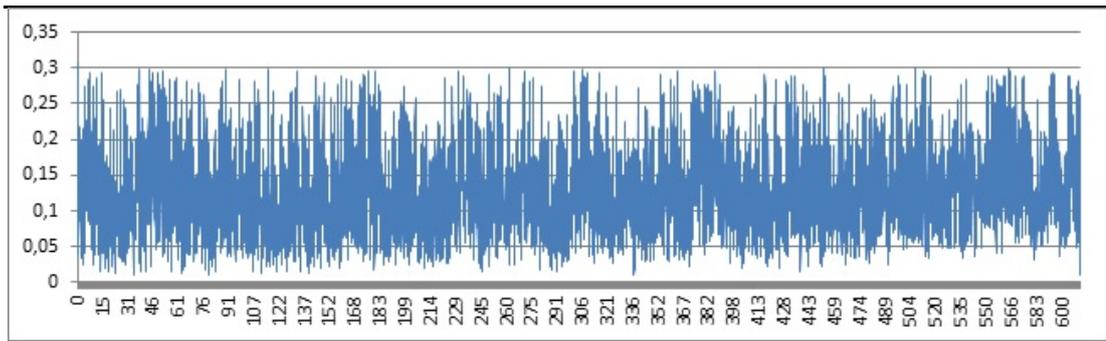


Рис.2. Звуковой фон необработанной воды

На прилагаемом графике (рис.3) видно, что в воде при мощности обработки 30 % от максимальной и времени обработки 20 мин по сравнению с необработанной водой, наблюдаются большие флуктуационные выбросы, уровень звукового фона уменьшается. Имеет место повышение температуры воды от 3 °С до 9,5 °С.

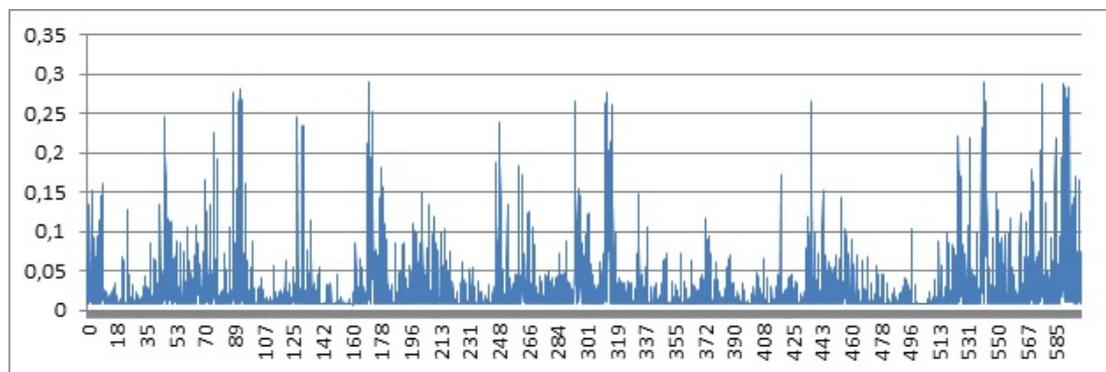


Рис.3. Звуковой фон обработанной воды при 30 % от максимальной мощности

При повышении уровня ультразвукового сигнала наряду с уменьшением общего фона, при постоянной температуре воды, наблюдается изменение флуктуационных выбросов (рис.4, 5).

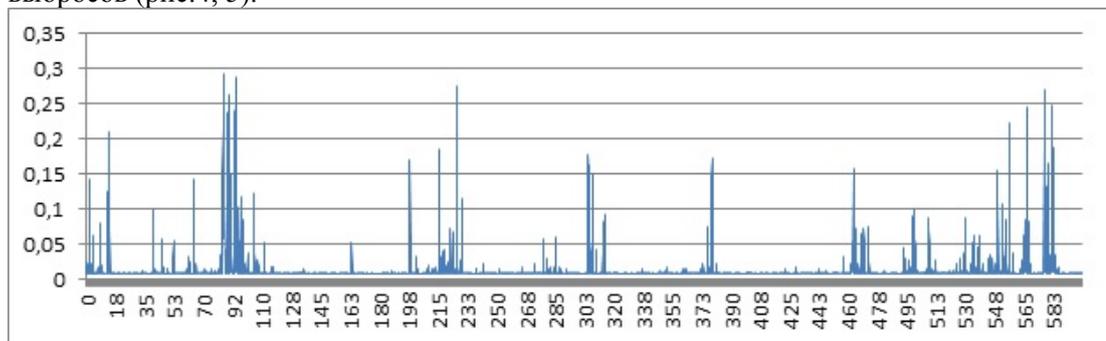


Рис.4. Звуковой фон обработанной воды при 50 % от максимальной мощности

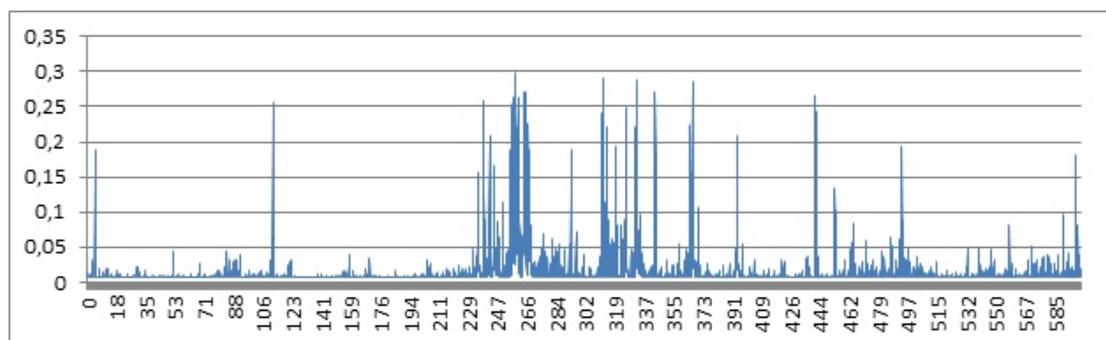


Рис.5. Звуковой фон обработанной воды при 60 % от максимальной мощности

В результате обработки ультразвуком вода нагревается (см. таблицу). Это объясняется тем, что при быстром сжатии кавитационного пузырька в парах воды происходит процесс, близкий к адиабатическому сжатию. Поскольку радиус пузырька может уменьшиться в десятки раз, вполне возможен нагрев паров воды на порядок, т.е. до 10^4 К [1]. Известно, что эффективность нагрева при адиабатическом процессе определяется показателем адиабаты, который, в свою очередь, сильно зависит от того, сколько атомный газ мы рассматриваем. Наиболее эффективно нагревание для одноатомных газов, так что даже небольшие примеси инертных газов в воде способны заметно повлиять на эффективность нагрева.

Температура водопроводной воды до и после обработки ультразвуком

Мощность от максимальной	Температура воды до обработки ультразвуком	Температура воды после обработки ультразвуком
30 %	3 °С	9,5 °С
40 %	3 °С	9,9 °С
50 %	3 °С	9,3 °С
60 %	3,2 °С	9,3 °С

Общая характеристика изменения количества импульсов звукового фона представлена на рис.6.

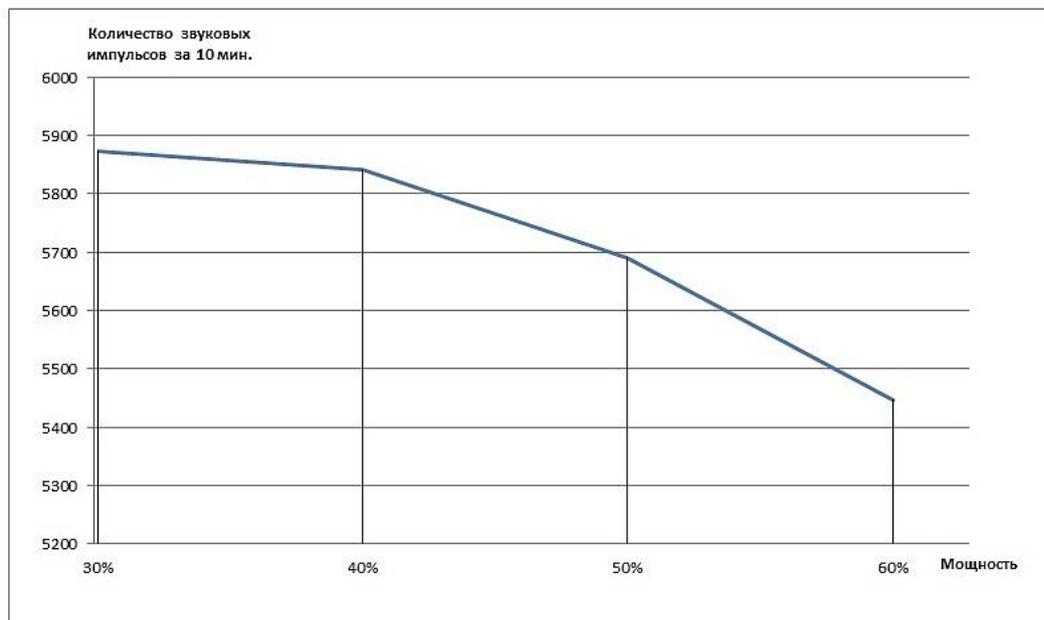


Рис.6. Общая характеристика изменений звуковых импульсов

Из графика видно, что возрастание акустических импульсов уменьшается. Это происходит в результате того, что при обработке воды ультразвуком малой мощности количество удаляемого воздуха меньше, чем при обработке большими мощностями. В связи с этим количество кавитационных пузырьков уменьшается с увеличением мощности.

Для определения влияния воздействия ультразвука на расклинивающее действие воды затворения, а, соответственно, и на процесс диспергирования частиц вяжущего был проведен седиментационный анализ.

Определение размеров частиц в цементной суспензии проводилось для суспензии, содержащей 2 г портландцемента строительного марки М500 и 150 мл водопроводной воды, предварительно обработанной ультразвуком малой мощности в течение 10 минут.

Методом седиментационного анализа было получено следующее распределение частиц по их размерам в суспензии цемента и в обычной водопроводной воде (рис.7).

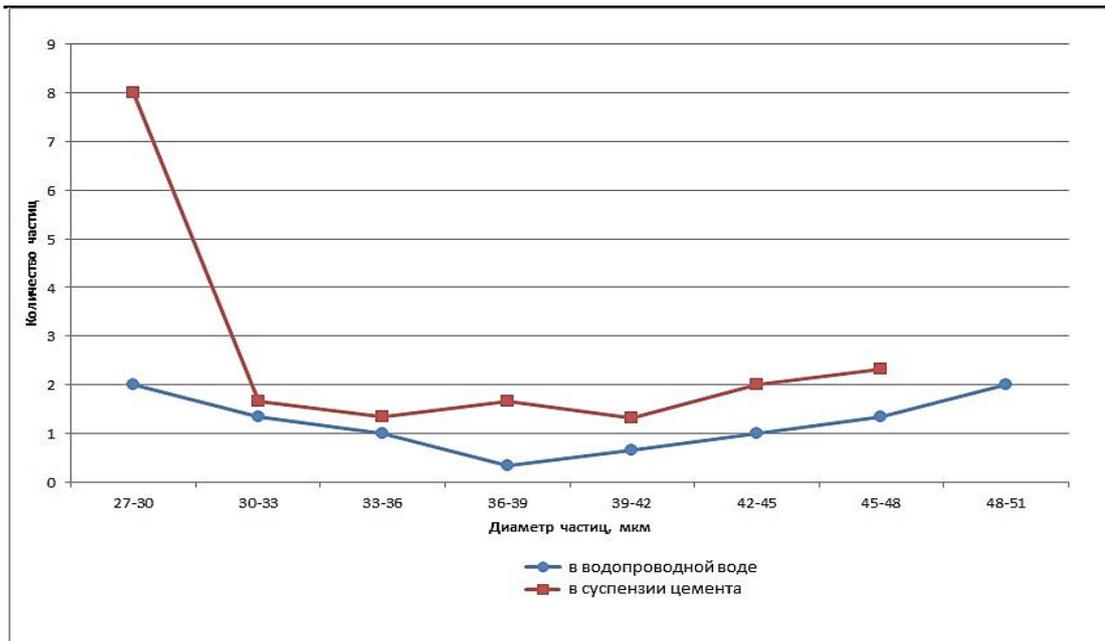


Рис.7. Распределение частиц по их размерам

В ходе исследований установлено, что в суспензии, приготовленной на обработанной ультразвуком воде, фракции цемента с радиусом от 48 до 51 мкм не обнаруживаются при увеличении процентного содержания более мелких частиц. В сравнении с водопроводной водой количество частиц с диаметром 27-30 мкм увеличивается, что свидетельствует о распаде более крупных частиц на более мелкие под действием ультразвука.

Анализ полученных данных свидетельствует о диспергировании частиц цемента в воде, подвергшейся воздействию ультразвуковых колебаний.

Обработка воды затворения низкочастотными ультразвуковыми колебаниями малой мощности обеспечивает повышение кавитационного эффекта, значительно усиливается эффект диспергации в водных растворах гидравлических вяжущих. Разработанная нами установка для обработки жидкости ультразвуком на основе аппарата «Волна» обеспечивает ускорение химических процессов в жидких средах. Таким образом, в работе экспериментально показано влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний малой мощности на дисперсные среды.

Список литературы

1. Дежкунов, Н.В. Оптимизация активности кавитации в импульсно модулированном ультразвуковом поле / Н.В. Дежкунов, П.В. Игнатенко, А.В. Котухов // Электронный журнал Техническая акустика. – 2007. – №16. – С.1–11.
2. Фокин, Г.А. Акустика в строительстве: монография / Г.А. Фокин, В.А. Смирнов. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 352 с.
3. Фокин, Г.А. Акустические и вихревые поля в водных растворах: монография / Г.А. Фокин, Я.А. Карасева, О.В. Тетюшева. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 151 с.
4. Маргулис, М.А. Сонолюминесценция / М.А. Маргулис // Успехи физических наук. – 2000. – Т.170. – №3. – С.263–285.

References

1. Dezhkunov, N.V. Optimization of the activity of cavitation in pulsed ultrasound / N.V. Dezhkunov, P.V. Ignatenko, A.V. Kotukhov // Electronic Journal Technical Acoustics. – 2007. – № 16. – P.1–11.
2. Fokin, G.A. acoustics in the building: monograph / G.A. Fokin, V.A. Smirnov. – Penza: PGUAS, 2006. – 352 p.
3. Fokin, G.A. Acoustic and vortex fields in aqueous solution: monograph / G.A. Fokin, J.A. Karaseva, O.V. Tetyusheva. – Penza: PGUAS, 2012. – 151 p.
4. Margulis, M.A. Sonoluminescence / M.A. Margulis // Successes of physical sciences. – 2000. – Volume 170. – № 3. – P.263–285.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Вернигорова Вера Никифоровна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Саденко Денис Сергеевич,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

Вернигоров Михаил Михайлович,
студент ИСТ-41/3

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Vernigorova Vera Nikiforovna,
Doctor of Science in Chemistry, Professor
of the department «Technology of building
materials and wood processing»

Sadenko Denis Sergeevich,
Postgraduate of the department «Technology
of building materials and wood processing»

Vernigorov Mikhail Mikhaylovich,
student IST-41/3

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ

В.Н. Вернигорова, Д.С. Саденко, М.М. Вернигоров

Рассматривается морфология поверхности частиц ГСК, полученных с добавками низкомолекулярных поверхностно-активных веществ (ПАВ) анионоактивного тетрадецилсульфата натрия и катионоактивного – алкамон ОС-2. Исследования проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа при увеличении в 30000 и 50000 крат соответственно.

Показано, что размеры частиц ГСК с добавкой тетрадецилсульфата натрия составляют от 1,5 до 35 нм. Нанорельеф поверхности – мозаичная структура; с добавкой алкамон ОС-2 – с кавернами и трещинами. Размеры частиц: от 2 до 6 нм и от 30 до 80 нм.

Выявлено, что морфология поверхности определяется длиной молекулярной цепи, молекулярной массой, гибкостью цепей, конформацией молекул ПАВ на поверхности и их взаимодействием с водой.

Ключевые слова: гидросиликаты кальция (ГСК), морфология поверхности, наночастицы, добавки ПАВ, электронный микроскоп, конформация молекул ПАВ.

SURFACE MORPHOLOGY OF CALCIUM HYDROSILICATES

V.N. Vernigorova, D.S. Sadenko, M.M. Vernigorov

Morphology of CHS particles surface is considered. The particles were obtained by addition of low molecular surface active substances (SAS) – anode active tetradecylsodium sulphate and cathode active alcomone OO-2. The research was done with the help of transmitted electronic microscope with 30000 and 50000 times enlargement. The size of CHS with tetradecylsodium sulphate is from 1,5 to 35 nm. The surface nanorelief is mosaic: with alcomone it has crashes and honeycombs. The size of the particles is from 2 to 6 nm and from 30 to 80 nm.

The morphology is determined by the length of molecular chain, molecular mass, chains elasticity, SAS molecules conformation and their interalation with water.

Keywords: calcium hydrosilicate, morphology of surface, electronic microscope, nanoparticles, SAS molecules conformation.

Гидросиликаты кальция (ГСК) являются основным связующим веществом в бетонах на портландцементной основе, в том числе и в малоцементных бетонах. При замешивании портландцементной смеси с водой формируется несколько физико-химических систем, так как содержание в портландцементе силикатов кальция составляет около 87 %.

Строительное материаловедение и производство строительных материалов постепенно переходят на рельсы нанотехнологий. Это связано с тем, что для четкого понимания структуры и свойств новых материалов на наноуровне, а также влияния наноструктуры на такие макроскопические свойства, как усадка, пластичность, прочность, старение и процесс гидратации, невозможно создавать инновационные строительные материалы с заданными и прогнозируемыми свойствами.

Согласно «Концепции развития нанотехнологий в Российской Федерации и работ в области нанотехнологий на период до 2010 года и на последующую перспективу» нанотехнология определяется как совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба [1]. Свойства материалов и веществ в нанометровом масштабе от 1 нм до менее 100 нм отличаются от свойств атомов и молекул и тем более от объемных свойств материала, состоящего из этих атомов или молекул. Бетонная смесь состоит из нескольких компонентов и при замешивании с водой превращается в высококонцентрированную суспензию. В действительности при протекании процесса гидратации бетонная смесь превращается в мультиреакционную систему, в которой каждая частица взаимодействует с водой. Одним из способов, обеспечивающих возможность контролируемым образом наномодифицировать поверхность частиц ГСК, является введение в реакционную систему добавок низкомолекулярных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Была поставлена задача: исследовать морфологию поверхности частиц синтезированных ГСК, а также определить размеры частиц, их форму и распределение. ГСК синтезировали в модельной на теме $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ с использованием химически чистых CaO , SiO_2 , H_2O при температуре 75°C с добавками ПАВ: анионоактивным веществом тетрадецилсульфатом натрия $\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{OSO}_3\text{Na}$ и катионоактивным веществом «алкамон ОС-2», имеющим химическую формулу: $[\text{C}_2\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)_2][\text{C}_6\text{H}_5\text{SO}_3]$ – (алкилдиоксиэтилен) метилметилдиэламмоний бензосульфат, где $n=16\dots 18$.

Тетрадецилсульфат натрия диссоциирует на маленький катион и отрицательно заряженный гидрофобный анион. Молекулярная масса тетрадецилсульфоната натрия составляет 293 г/моль; критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) составляет 8 ммоль/дм³. Алкамон ОС – 2 диссоциирует на маленький анион и крупный гидрофобный положительно заряженный катион. Молекулярная масса алкамон ОС-2 составляет 547 г/моль, а ККМ=3 г/дм³.

Синтез гидросиликатов кальция вели в течение 14 суток. Для определения размеров частиц и их распределения был использован просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) высокого разрешения. Исследования проводили методом одноступенчатой реплики. На частицы ГСК наносили угольную реплику толщиной около 10 нм, что регулировалось по цвету. Время напыления реплики составляло 23 с. Напыление производили на электронно-микроскопическом poste ЭВП-2. Травление угольной реплики производили в плавиковой кислоте. Съемка электронных фотографий ГСК производилась с увеличением в 30000 и 50000 крат. Это значит, что на фотографии 3,0 см и 5,0 см соответствуют 1 мк или 1000 Å или 100 нм.

На рис. 1 представлена электронная фотография ГСК, полученных с добавкой поверхностно-активного вещества тетрадецилсульфата натрия при концентрации его, равной 250 мг/дм³,

Из рис. 1 следует, что морфология поверхности частиц представляет собой сложные переплетения, образующие мозаичное изображение. Частицы ГСК имеют различную форму от сферической до удлиненной изогнутой. Размеры частиц колеблются в пределах: от 1,5 нм до 35 нм. Из рис. 1 видно, что наночастицы окружены дислокациями.

На рис.2 представлена электронная фотография ГСК, полученных с катионоактивным веществом алкамон ОС-2 при температуре 75°C с увеличением в 50000 крат и при концентрации ПАВ 0,25 г/дм³.



Рис.1. Электронная фотография ГСК, полученных с тетрадецилсульфатом натрия при температуре 75 °С при увеличении в 30000 крат и при концентрации ПАВ 0,25 г/см³



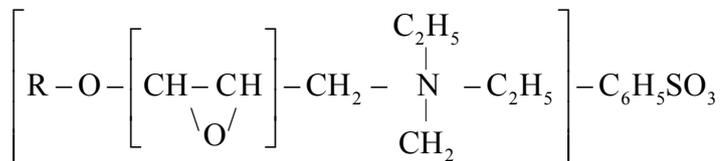
Рис.2. Электронная фотография ГСК, полученных с алкамон ОС-2 при температуре 75 °С с увеличением в 50000 крат и при концентрации 0,25 г/дм³

Из рис.2 следует, что морфология поверхности частиц ГСК представляет собой нанорельеф с трещинами и кавернами. Поверхность частиц ГСК и их структура состоят из блоков, имеющих разные размеры. Блоки состоят из более мелких по размеру наночастиц. По границам блоков и частиц видны дислокационные петли. Размеры блоков колеблются в интервале от 30 до 80 нм; размеры наночастиц – от 2 до 6 нм.

Сравнивая морфологию поверхности частиц ГСК, представленных на рис. 1 и 2, можно утверждать, что гранулометрический состав ГСК и распределение частиц более однородны с добавкой тетрадецилсульфата натрия. И тетрадецилсульфат натрия, и алкамон ОС-2 – поверхностно-активные вещества, которые вследствие дифильного строения молекул адсорбируются на поверхности частиц ГСК, поэтому строения, размеры и гибкость их цепей, а также энергия их взаимодействия как с частицами, так и с молекулами воды, формируют морфологию поверхности и размеры частиц ГСК. Молекулы тетрадецилсульфата натрия цепные, гибкие. В конце этих молекул находятся три атома – два атома кислорода и атом серы с неподеленными парами электронов, которые адсорбируются на положительно заряженных катионов кальция и кремния. Углеводородный радикал трудно совмещается с молекулами воды и поэтому

скручивается в клубок. Однако вследствие того, что длина цепи невелика, то клубок, очевидно, образуется рыхлый, сквозь который проходят молекулы воды, то есть рыхлые клубки выполняют роль своеобразного молекулярного сита, через которое проходят молекулы воды и локально взаимодействуют и с CaO, и с SiO₂, способствуя их взаимодействию между собой и формированию наночастиц ГСК.

Строение молекул катионоактивного вещества алкамон ОС-2 несколько иное. Длина углеводородного радикала больше. По мере удлинения цепей, то есть увеличения молекулярной массы, изгибы цепей все более приближают молекулы к свернутой форме. Однако, как показано на схеме, строение молекулы ОС-2 анизотропно:



Из схемы видно, что молекулы ОС-2 имеют линейное строение. Основными структурными единицами молекулы являются углеродный радикал, содержащий 18 атомов углерода, гетероциклические фрагменты, содержащие атомы кислорода, азота и серы с неподеленными парами электронов и бензольное ядро. Наличие бензольного ядра делает молекулу частично жесткоцепной. Длинный углеводородный радикал, не совместимый с молекулами воды, будет сворачиваться в рыхлый клубок, через который, как через сито, будут проходить молекулы воды и формировать наночастицы ГСК. Жесткая часть молекулы ОС-2, содержащая гетероатомы кислорода, серы и бензольное ядро с П-системой р-электронов, будет электростатически притягивать молекулы воды с образованием водородных связей. Конформация молекул ОС-2 такова: углеводородный радикал будет скручен в рыхлый клубок. Гетероцепная часть молекулы с бензольным ядром образует на поверхности рыхлую пленку, через которую прохождение молекул воды к поверхности частиц CaO и SiO₂ более легкое и свободное. По абсолютному размеру частиц ГСК делятся на следующие типы: 1. Размеры частиц от 100 до 40 нм – субмикрористаллические ГСК. 2. Размеры частиц менее 40 нм – нанокристаллические ГСК. Следовательно, с добавкой тетрадецилсульфата натрия формируются только нанокристаллические ГСК; с добавкой алкамон ОС-2 – и нанокристаллические, и субмикрористаллические. Конформация молекул ОС-2 на поверхности имеет вид кресла.

Выводы

1. Влияние добавок низкомолекулярных ПАВ на морфологию поверхности зависит от длины молекулярной цепи, ее молекулярной массы, гибкости и конформации на поверхности частиц.

2. Конкретно, только конформация молекул ПАВ определяет морфологию поверхности частиц ГСК, их распределение и характер взаимодействия с водой.

Список литературы

1. Малинецкий, Г.Г. Нанотехнологии. От алхимии к химии и дальше / Г.Г. Малинецкий. – М.: Интеграл, 2007. – №5. – С. 4–5.
2. Вернигорова, В.Н. Физико-химические основы материаловедения дисперсных строительных материалов. Ч. II / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 230 с.

References

1. Malinetskii, G.G. Nanotechnology. From alchemy to chemistry and on / G.G. Malinetskii. – M.: Integral, 2007. – № 5. – P. 4–5.
2. Vernigorova, V.N. Physico-chemical basis of dispersed materials of construction materials. Part II / V.N. Vernigorova, S.M. Sadenko. – Penza: PGUAS, 2011. – 230 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник научно-исследовательского сектора
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Саденко Денис Сергеевич,
аспирант кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: Sadenko_d@list.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Korovkin Mark Olimpiievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology of building
materials and wood processing»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Eroshkina Nadezda Alexandrovna,
Candidate of Sciences, Senior Researcher
of scientific and research sector
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Sadenko Denis Sergeevich,
Postgraduate of the department «Technology
of building materials and wood processing»
E-mail: Sadenko_d@list.ru

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА НА ЕГО ВОДОРЕДУЦИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, Д.С. Саденко

Выявлена зависимость водоредуцирующего эффекта суперпластификатора от способа его введения в портландцементные системы и пластичности смеси.

Ключевые слова: суперпластификатор, водоредуцирующий эффект, эффективность способа введения, портландцемент, вяжущее низкой водопотребности.

INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZER INTRODUCTION ON WATER-REDUCING EFFECT

M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, D.S. Sadenko

The superplasticizer water-reducing effect dependence on the method of its introduction in Portland cement systems and plasticity of the mixture was found.

Keywords: superplasticizer, water-reducing effect, the effectiveness of the method of introduction, Portland cement, cement with low water requirement.

Разработка и широкое практическое применение суперпластификаторов (СП) обеспечили основной прогресс в технологии бетонов за три последних десятилетия. Значительный водоредуцирующий эффект, достигаемый при введении в бетонную смесь этих добавок, позволяет существенно повысить прочность и долговечность бетона [1].

В научно-технической литературе отмечается, что процедура совмещения СП с цементом может оказывать существенное влияние на водоредуцирующий эффект [1, 2]. Однако особенности взаимодействия этих добавок с вяжущим при различных методах введения СП, а также преимущества и недостатки этих методов недостаточно изучены, что не позволяет полностью использовать возможности СП.

По мнению многих авторов [1-3], путем совмещения СП с цементом при его помоле или домале можно получить более высокий водоредуцирующий эффект по сравнению с введением добавки в смесь в виде сухого порошка или с водой затворения (традиционный метод введения добавок). Однако имеются данные, показывающие, что в жестких и малопластичных смесях введение СП при помоле не позволяет достичь более высокого водоредуцирующего эффекта в сравнении с другими способами совмещения добавки с цементом только при измельчении цемента до удельной поверхности 450 м²/кг [4].

В обозримом будущем возможности повышения прочности бетона полностью использованы не будут из-за консервативности строительной отрасли. В связи с этим основным направлением использования водоредуцирующего эффекта СП в технологии бетона будет повышение его долговечности. Значительно более высокие характеристики долговечности бетона с добавкой СП, как показывают исследования [5], могут быть достигнуты за счет увеличения расхода вяжущего.

Целью исследований являлось выявление факторов, влияющих на эффективность различных способов введения СП: в виде сухого порошка, при доизмельчении цемента совместно с добавкой и с водой затворения.

Анализ механизма взаимодействия цемента и СП при различных способах введения добавки показывает, что на начальных этапах условия этого взаимодействия значительно различаются. На рис. 1 показана схема распределения и взаимодействия СП с цементом и продуктами его гидратации при трех различных способах введения добавки. При введении СП с водой затворения действующее вещество добавки распределено в жидкой фазе равномерно. Одновременно с гидратацией цемента происходят необратимая сорбция СП на поверхности новообразований и снижение коагуляционных явлений в цементном тесте, что уменьшает предельное напряжение сдвига и вязкость цементного теста. Большая часть добавки сорбируется на продуктах гидратации алюминатных минералов из-за высокой удельной поверхности этих фаз [3]. В процессе гидратации алюминатных фаз происходит конкурирующее взаимодействие действующего вещества СП и гипса с алюминатными фазами. В связи с этим введение добавки на последних стадиях перемешивания или многостадийное введение обеспечивает более равномерную хемосорбцию СП на всех продуктах гидратации цемента, что дает больший водоредуцирующий эффект.

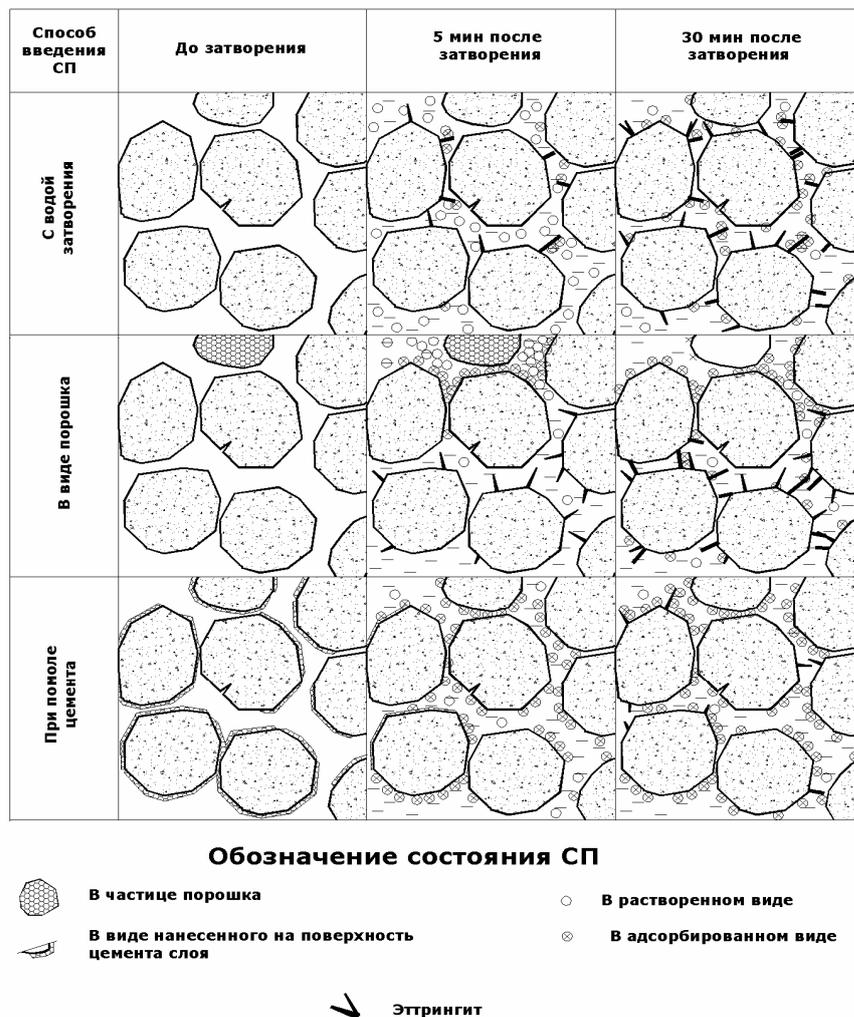


Рис. 1. Схема распределения СП в цементном тесте при различных способах его введения

При введении СП в виде сухого порошка, размеры частиц которого сопоставимы с размерами частиц цемента, распределение добавки в вяжущем не равномерно, так как приблизительно на 1 частицу СП приходится около 100 частиц вяжущего. При затворении водой концентрация СП вблизи части вяжущего составляет десятки процентов (см. рис.1), и если не осуществляется интенсивного перемешивания смеси, то добавка необратимо сорбируется на поверхности близлежащих частиц. При этом на поверхности большинства частиц цемента, находящихся на значительном расстоянии от растворяющейся частицы СП, сорбция происходит в гораздо меньшем количестве. При данном способе введения СП взаимодействие добавки с цементом для значительной доли частиц осуществляется так же, как и при отсроченном введении добавки.

Введение СП в цемент при помоле обеспечивает равномерное распределение добавки на поверхности частиц вяжущего, которая может быть покрыта слоем СП со средней толщиной 1...5 нм при дозировке добавки 0,5...2 %. При затворении водой этот слой растворяется. Вблизи гидратирующей поверхности цемента, с которой происходит растворение добавки, ее концентрация в десятки раз выше, чем в случае введения добавки с водой затворения. Это обеспечивает более равномерную сорбцию СП на поверхности всех продуктов гидратации, образовавшихся на самых ранних стадиях, в результате достигается более высокий водоредуцирующий эффект.

Для выявления влияния способа введения СП С-3 был проведен эксперимент с использованием трех цементов: ЗАО «Жигулевские стройматериалы», ЗАО «Осколцемент», ОАО «Подольск-цемент» при расходе добавки 0,7 %. Исследования выполнялись на растворных смесях состава 1:2. В ходе эксперимента подбирались водоцементные отношения, обеспечивающие расплыв смеси на встряхивающем столике 110...190 мм по ГОСТ 310.4-81 и под действием собственного веса из формы-конуса 120...200 мм. По полученным результатам рассчитывались водоредуцирующие эффекты для равнопластичных смесей.

Цементы доизмельчались совместно с СП в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности 3500 и 4500 см²/г. Цементы для приготовления растворных смесей, в которые СП вводились в виде порошка и с водой затворения, также измельчались до этих же удельных поверхностей.

Для сопоставления эффективности различных способов совмещения СП с цементом использовался коэффициент эффективности $K_{эф}$, который рассчитывался как отношение водоредуцирующего эффекта для того или иного способа к водоредуцирующему эффекту при введении добавки традиционным способом (с водой затворения).

Зависимость водоредуцирующего эффекта СП от времени определения консистенции для жестких и малопластичных смесей (расплыв конуса на встряхивающем столике 110 и 190 мм, соответственно) при различных способах введения добавки приведена в таблице.

Зависимость водоредуцирующего эффекта СП С-3 от способов его введения, времени определения консистенции в смесях с различной удобоукладываемостью на различных цементах

$S_{уд}$, м ² /кг	Консистенция смеси	Способ введения СП	Водоредуцирующий эффект, %, после выдерживания смеси в течение различных интервалов времени, мин						
			5	15	30	45	60	90	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Жигулевские стройматериалы»									
350	Жесткая	При помоле	30,1	28,6	28,1	28,9	29,5	29,6	25,8
		В виде порошка	25,3	25,3	25,2	25,4	25,0	25,2	24,1
	Пластичная	При помоле	22,1	20,5	19,6	20,0	20,4	20,5	12,8
		В виде порошка	23,8	20,1	17,4	18,2	18,5	17,6	16,6
450	Жесткая	При помоле	33,8	27,9	25,5	24,0	23,7	25,2	25,1
		В виде порошка	41,6	31,2	27,3	25,6	24,2	21,7	19,3
	Пластичная	При помоле	26,7	22,7	19,1	17,2	16,8	14,3	6,2
		В виде порошка	23,4	20,6	18,4	18,2	18,8	16,5	11,0
ПЦ 500 Д0 ОАО «Подольск-цемент»									
350	Жесткая	При помоле	29,0	15,7	13,3	12,9	12,1	12,4	8,7
		В виде порошка	25,8	18,4	16,0	15,0	15,2	18,3	16,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
450	Пластичная	При помоле	20,0	10,9	6,6	6,8	8,9	9,1	4,2
		В виде порошка	23,7	15,8	11,1	8,8	10,3	11,1	9,7
	Жесткая	При помоле	29,0	16,1	13,5	12,5	12,0	12,4	8,7
		В виде порошка	25,8	18,4	16,0	15,0	15,1	18,3	16,7
350	Жесткая	При помоле	18,5	18,6	17,1	15,7	13,9	17,7	16,3
		В виде порошка	24,0	20,9	19,6	16,8	14,7	14,7	9,4
	Пластичная	При помоле	16,3	12,6	12,3	12,8	16,7	14,4	1,1
		В виде порошка	18,2	13,3	9,8	10,2	11,9	6,6	0,0
450	Жесткая	При помоле	12,9	14,1	22,1	23,7	23,8	19,0	12,5
		В виде порошка	26,8	18,4	18,2	20,0	22,2	22,8	21,1
	Пластичная	При помоле	18,2	11,3	6,8	1,5	-4,1	-7,3	-4,5
		В виде порошка	17,3	16,6	14,8	13,0	11,4	4,9	4,0

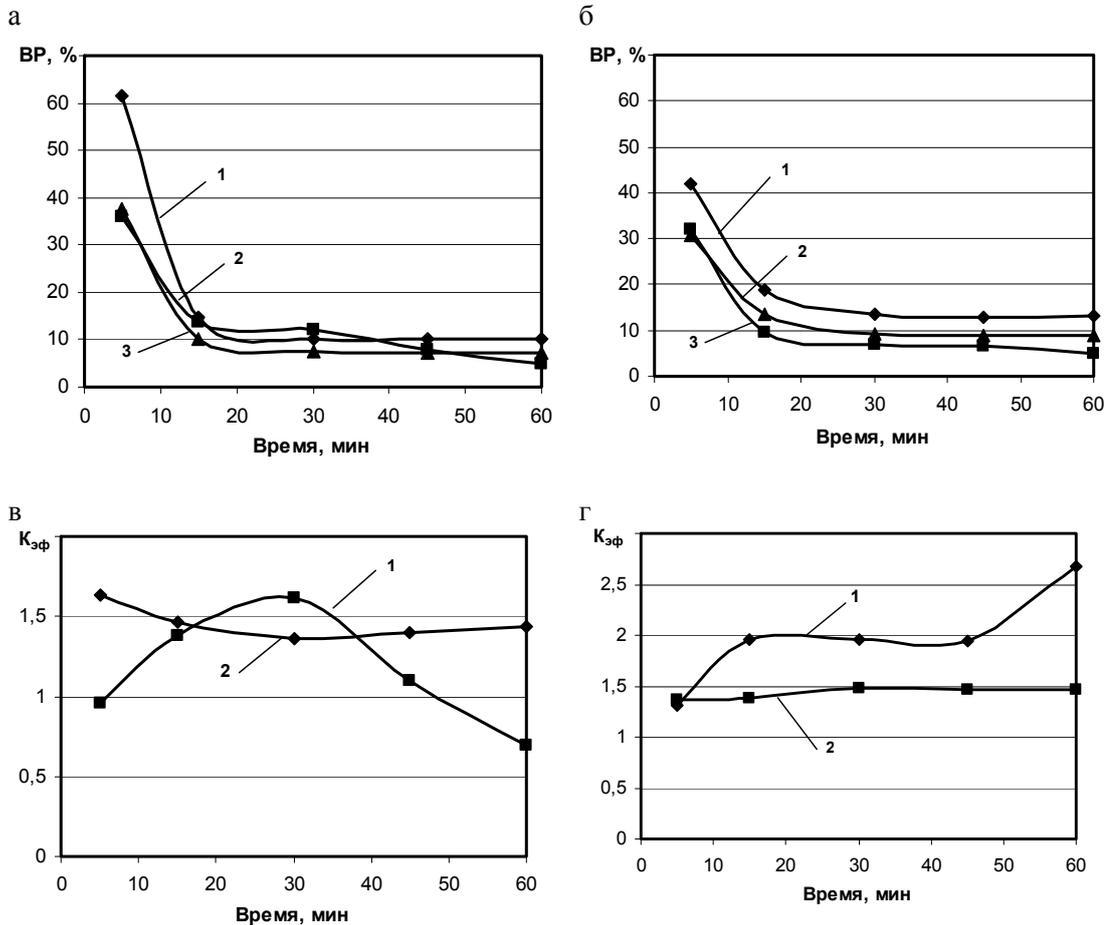


Рис. 2. Зависимость водоредуцирующего эффекта СП С-3 (а, б) и коэффициента эффективности способа введения добавки (в, г) от времени испытания смесей с консистенцией, характеризующейся расплывом смеси под действием собственного веса: 120 мм (а, в) и 200 мм (б, г) для различных способов введения СП в цемент (1 – при помоле цемента с СП; 2 – в виде порошка; 3 – с водой затворения)

Как видно из данных, приведенных в таблице, для большинства составов эффективность двух способов введения СП С-3 находится приблизительно на одном уровне. Эти данные согласуются с результатами исследований, полученными при использовании цемента ОАО «Вольскцемент» [4]. В связи с чем был сделан вывод об отсутствии преимуществ введения этого СП при помоле цемента, если консистенция смесей характеризовалась распылом на встряхивающем столике в интервале 110...190 мм, который обеспечивался водоцементным отношением 0,3...0,4.

При увеличении водоцементного отношения до 0,5...0,6 и пластичности смесей до умеренно пластичной и пластичной консистенций (распыл из формы-конуса под действием собственного веса соответственно 120 и 200 мм) водоредуцирующий эффект при введении СП в виде сухого порошка и при помоле цемента возрастает в сравнении с традиционным методом введения СП в 1...1,7 раза для умеренно пластичных смесей и в 1,5...2 раза для пластичных смесей (рис.2).

Повышение пластичности смеси за счет увеличения расхода воды обеспечивает более высокое и стабильное во времени действие добавки.

Проведенные исследования позволили установить, что совмещение суперпластификатора с цементом при помоле (технология вяжущих низкой водопотребности) и в виде сухого порошка в смесях с низким водоцементным отношением не позволяет получить более высокий водоредуцирующий эффект в сравнении с введением этой добавки с водой затворения. Преимущества этих способов проявляются при повышении водоцементного отношения. В связи с этим использование вяжущих низкой водопотребности в технологии сборных железобетонных конструкций, изготавливаемых из жестких смесей, будет малоэффективным.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение вяжущих низкой водопотребности эффективно только в пластичных и самоуплотняющихся бетонных смесях.

Список литературы

1. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.
2. Калашников, В. И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Калашников. – Воронеж, 1996. – 89 с.
3. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В. Г. Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
4. Коровкин, М.О. Исследование эффективности суперпластификатор С-3 в вяжущем низкой водопотребности / М.О. Коровкин // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 2. – С. 83–87.
5. Коровкин, М.О. Ресурсосберегающая эффективность суперпластификатора в бетоне / М.О. Коровкин, В.И. Калашников // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – С. 59–61.

References

1. Bazhenov, U.M. Concrete Technology / U.M. Bazhenov. – M.: Publishing House of the DIA, 2007. – 528 p.
2. Kalashnikov, V.I. Basics plasticizing mineral dispersion systems for building materials: Dis. ... Dr. tech. Science / V.I. Kalashnikov. – Voronezh, 1996. – 89 p.
3. Batrakov, V.G. Modified concrete. Theory and practice / V.G. Batrakov. – M.: Technoprojekt, 1998. – 768 p.
4. Korovkin, M.O. Durability effect of a superplasticizer in concrete / M.O. Korovkin, V.I. Kalashnikov // Regional architecture and engineering. – 2011. – №2. – P. 59-61.
5. Korovkin, M.O. Study of the effectiveness of superplasticizer s-3 in binders with a low water requirement / M.O Korovkin // Construction and reconstruction. – 2011. – №2. – P. 83–87.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 539.373

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Bakushev Sergey Vasilevich,
Doktor of Sciences,
Professor of the Department «Mechanic»
E-mail: tim-graf_penza@rambler.ru

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ СТЕРЖНЯ С ДВУМЯ ОСЯМИ СИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ НАГРУЗКОЙ

С.В. Бакушев

Рассматривается задача расчёта с использованием математического пакета MathCAD изгибаемого стержня, находящегося в условиях плоского поперечного изгиба, от действия равномерно распределённой нагрузки. Поперечное сечение стержня с двумя осями симметрии имеет форму равнополочного двутавра. В результате решения определяются: несущая способность стержня при условии полной пластичности; граница упругих и пластических деформаций; остаточные напряжения в стержне после его полной разгрузки; изогнутая ось стержня и остаточные прогибы в стержне после его полной разгрузки.

Ключевые слова: пластичность, упругопластический изгиб, сечение с двумя осями симметрии.

ELASTOPLASTIC ROD BEND WITH TWO AXES OF DISTRIBUTING LOADING SIMMETRY

S.V. Bakushev

The problem of calculating bendable rod in the state of flat cross-section bend due to the steadily distributed loading is considered. The cross-section of a rod with two axis of symmetry has a form of equal-channel flange beam. The author solves the problem using mathematical unit MathCAD. As a result he determines: the bearing ability of the rod in the condition of complete plasticity, a boundary of elastic and plastic deformations, remained strength in the rod after its complete unloading bent axe and remained deflection in the rod after its complete unloading.

Keywords: plasticity, elastoplastic rod bend, section with two axes of symmetry.

К одной из простейших задач теории пластичности относится задача о поперечном упругопластическом изгибе стержня, поперечное сечение которого имеет две оси симметрии, а материал стержня работает в соответствии с идеализированной диаграммой Прандтля (рис. 1). Однако, если поперечное сечение отлично от прямоугольного и изменяется по высоте сечения дискретно, исследование напряжённо-деформированного состояния стержня сталкивается со значительными математическими трудностями, связанными прежде всего с необходимостью построения аналитического выражения для высоты упругого ядра как функции продольной координаты. Вместе с тем, если для расчёта стержня, находящегося в условиях плоского упругопластического изгиба, воспользоваться готовыми математическими пакетами из библиотеки прикладных программ для персональных компьютеров, например пакетом MathCAD, то эти затруднения успешно, хотя и не просто, преодолеваются.

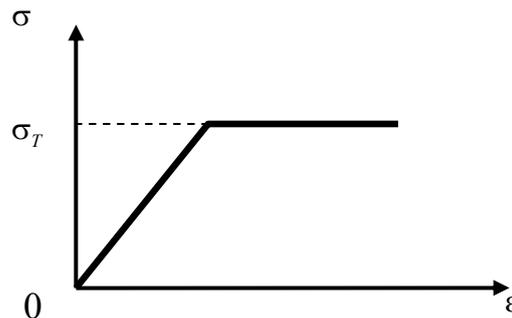


Рис. 1

Напомним основные положения расчёта на изгиб упругопластического стержня с двумя осями симметрии [1, 2, 3]. Будем полагать, что в зоне упругопластических деформаций верхние волокна в сечении стержня сжаты, а нижние растянуты. Для поперечного сечения с двумя осями симметрии нейтральная ось в стадии упругопластического деформирования (ось x) будет совпадать с центральной осью (ось x_0).

Величина разрушающей нагрузки при плоском поперечном упругопластическом изгибе стержня, работающего в соответствии с идеализированной диаграммой Прандтля, определяется из условия, что изгибающий момент $M_x(z_0)$ в опасном сечении z_0 стержня не должен превышать величину разрушающего момента $M_{\text{разр}}$:

$$M_x(z_0) \leq M_{\text{разр}}. \quad (1)$$

Величина разрушающего момента для случая полной пластичности равна:

$$M_{\text{разр}} = 2\sigma_T \cdot S_x^T. \quad (2)$$

Здесь $S_x^T = \int_0^{\frac{h}{2}} y \cdot b(y) dy$; $b(y)$ – ширина поперечного сечения стержня.

Повышение несущей способности изгибаемого стержня, рассчитанного по разрушающему моменту, оценивается коэффициентом

$$\beta = \frac{M_{\text{разр}}}{M_{x_0}^T}. \quad (3)$$

Здесь $M_{x_0}^T = \sigma_T \frac{2I_{x_0}}{h}$ – изгибающий момент, при котором в опасном сечении появляется текучесть в фибровых волокнах; I_{x_0} – момент инерции поперечного сечения относительно центральной оси.

Коэффициент β показывает, во сколько раз должна возрасти нагрузка от момента появления текучести в фибровых волокнах опасного поперечного сечения стержня до полного исчерпания им несущей способности.

Для вычисления функций $h^Y(z)$ – высоты упругого ядра – следует воспользоваться равенством внутреннего момента изгибающему моменту от внешней нагрузки $M_x(z)$:

$$\sigma_T \left[\left(S_{xx}^T(z) + S_{sx}^T(z) \right) + \frac{2I_x^Y(z)}{h^Y(z)} \right] = M_x(z). \quad (4)$$

$$\text{Здесь } S_{xx}^T(z) = \int_{-\frac{1}{2}h}^{-\frac{1}{2}h^Y(z)} y \cdot b(y) dy; \quad S_{sx}^T(z) = \int_{+\frac{1}{2}h^Y(z)}^{+\frac{1}{2}h} y \cdot b(y) dy; \quad I_x^Y(z) = \int_{-\frac{1}{2}h^Y(z)}^{+\frac{1}{2}h^Y(z)} y^2 \cdot b(y) dy.$$

Границу упругого и упругопластического участков стержня z^T находят из условия

$$\sigma_T \frac{2I_{x_0}}{h} = M_x(z^T). \quad (5)$$

Здесь $M_x(z^T)$ – изгибающий момент от внешней нагрузки.

Нормальные напряжения в поперечном сечении стержня, испытывающем упругопластический изгиб, находят в соответствии с равенствами:

$$\sigma_z(z, y) = \sigma_T, \text{ если } y \leq -\frac{1}{2}h^Y(z) \text{ или } y \geq \frac{1}{2}h^Y(z); \quad (6)$$

$$\sigma_z(z, y) = \sigma_T \frac{2y}{h^Y(z)}, \text{ если } |y| < \frac{1}{2}h^Y(z). \quad (7)$$

В области поперечного сечения, где нормальные напряжения равны пределу текучести σ_T , касательные напряжения равны нулю: $\tau_{zy} = 0$.

Для сечений, в которых зоны пластичности охватывают и верхние, и нижние волокна стержня, касательные напряжения в точках поперечного сечения, расположенных в зоне упругих деформаций сжатия, равны:

$$\tau_{zy}^s(z, y) = \frac{\sigma_T}{b(y)} \left\{ \frac{\partial A_s^T(z)}{\partial z} + \frac{2}{h^Y(z)} \frac{\partial S_{sx}^{Y,orc}(z, y)}{\partial z} - \frac{2S_{sx}^{Y,orc}(z, y)}{[h^Y(z)]^2} \frac{\partial h^Y(z)}{\partial z} \right\}. \quad (8)$$

Касательные напряжения в точках поперечного сечения, расположенных в зоне упругих деформаций растяжения, определяются по формуле

$$\tau_{zy}^t(z, y) = \frac{\sigma_T}{b(y)} \left\{ \frac{\partial A_s^T(z)}{\partial z} + \frac{2}{h^Y(z)} \frac{\partial [S_{sx}^Y(z) - S_{tx}^{Y,orc}(z, y)]}{\partial z} - \frac{2[S_{sx}^Y(z) - S_{tx}^{Y,orc}(z, y)]}{[h^Y(z)]^2} \frac{\partial h^Y(z)}{\partial z} \right\}. \quad (9)$$

$$\text{Здесь } A_s^T(z) = \int_{+\frac{1}{2}h^Y(z)}^{\frac{1}{2}h} b(y') dy'; \quad S_{sx}^{Y,orc}(z, y) = \int_y^{\frac{1}{2}h^Y(z)} y' \cdot b(y') dy', \quad 0 \leq y \leq +\frac{1}{2}h^Y(z);$$

$$S_{sx}^Y(z) = \int_0^{\frac{1}{2}h^Y(z)} y' \cdot b(y') dy'; \quad S_{ix}^{Y,отс}(z, y) = \int_y^0 y' \cdot b(y') dy', \quad -\frac{1}{2}h^Y(z) \leq y \leq 0.$$

Если стержень, находящийся в условиях плоского поперечного упругопластического изгиба, нагружен равномерно распределённой нагрузкой q , то на горизонтальных площадках возникают нормальные напряжения $\sigma_y(z, y)$. В пластической области сжатой части поперечного сечения напряжения на горизонтальных площадках определяются соотношением $\sigma_y(y) = \frac{q}{b(y)}$.

На горизонтальных площадках в пределах упругого ядра нормальные напряжения вычисляются по формуле

$$\sigma_y(z, y) = \frac{q}{b(y)} - \frac{1}{b(y)} \int_{A_{отс}^Y(z, y)} \frac{d\tau_{zy}(z, y)}{dz} dA. \quad (10)$$

На горизонтальных площадках в пределах пластической области растянутой части поперечного сечения напряжения на горизонтальных площадках равны:

$$\sigma_y(z, y) = \frac{q}{b(y)} - \frac{1}{b(y)} \int_{A^Y(z)} \frac{d\tau_{zy}(z, y)}{dz} dA. \quad (11)$$

$$\text{Здесь } A_{отс}^Y(z, y) = \int_y^{\frac{1}{2}h^Y(z)} b(y') dy'; \quad A^Y(z) = \int_{-\frac{1}{2}h^Y(z)}^{\frac{1}{2}h^Y(z)} b(y') dy'.$$

Остаточные нормальные $\sigma_z^{ост}$, касательные $\tau_{zy}^{ост}$ и нормальные напряжения на горизонтальных площадках $\sigma_y^{ост}$ в поперечном сечении стержня в области упругопластических деформаций, после его полной разгрузки, определяются путём алгебраического сложения соответствующих напряжений $\sigma_z(z, y)$, $\tau_{zy}(z, y)$, $\sigma_y(z, y)$ в стадии пластического нагружения и соответствующих напряжений при упругой разгрузке $\sigma_z^{разгр}(z, y)$, $\tau_{zy}^{разгр}(z, y)$, $\sigma_y^{разгр}(z, y)$:

$$\sigma_z^{ост}(z, y) = \sigma_z(z, y) - \sigma_z^{разгр}(z, y). \quad (12)$$

$$\tau_{zy}^{ост}(z, y) = \tau_{zy}(z, y) - \tau_{zy}^{разгр}(z, y). \quad (13)$$

$$\sigma_y^{ост}(z, y) = \sigma_y(z, y) - \sigma_y^{разгр}(z, y). \quad (14)$$

$$\text{Здесь } \sigma_z^{разгр}(z, y) = \frac{M_{x_0}(z)}{I_{x_0}} y; \quad \tau_{zy}^{разгр}(z, y) = \frac{Q_y(z) \cdot S_{x_0}^{отс}(y)}{I_{x_0} \cdot b(y)};$$

$$\sigma_y^{разгр}(z, y) = \frac{q}{b(y)} - \frac{1}{b(y)} \int_{A_{отс}(y)} \frac{d\tau_{zy}^{разгр}(z, y)}{dz} dA; \quad A_{отс}(y) = \int_y^{\frac{1}{2}h} b(y') dy'.$$

Дифференциальное уравнение оси изогнутого стержня в области упругопластических деформаций имеет вид:

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = \frac{2\sigma_T}{Eh^Y(z)}. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение оси изогнутого стержня в области упругопластических деформаций после его полной разгрузки определяется соотношением

$$\frac{d^2 V_{ocm}(z)}{dz^2} = \frac{2\sigma_T}{Eh^Y(z)} - \frac{M_{x_0}(z)}{EI_{x_0}}. \quad (16)$$

Здесь E – модуль упругости материала стержня.

Рассмотрим стальной стержень на двух опорах, находящийся в условиях плоского поперечного упругопластического изгиба (рис. 2). Поперечное сечение стержня имеет форму равнополочного двутавра (рис. 3). Требуется определить: несущую способность стержня при условии полной пластичности; границу упругих и пластических деформаций; остаточные напряжения в стержне после его полной разгрузки; изогнутую ось стержня и остаточные прогибы в стержне после его полной разгрузки. Материал стержня работает в соответствии с идеализированной диаграммой Прандтля (см. рис. 1).

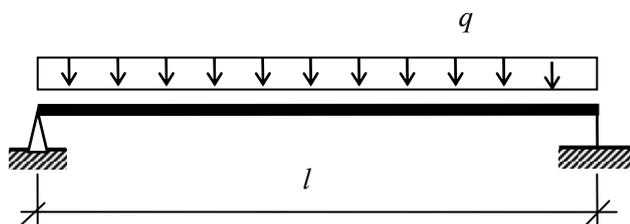


Рис. 2

Исходные данные:

- длина стержня $l = 6,0$ м;
- размеры поперечного сечения: $h = 0,40$ м; $b = 0,025$ м; $a_n = 2b$; $a_v = 2b$; $b_n = 3b$; $b_v = 2b$;
- предел текучести материала стержня $\sigma_T = 240 \cdot 10^6$ Па;
- модуль упругости $E = 200 \cdot 10^9$ Па;
- коэффициент запаса $k = 1,2$.

Далее рассмотрим результаты решения данной задачи в среде математического пакета MathCAD.

Изгибающий момент, при котором в фибровых волокнах напряжения достигают предела текучести, $M_T = 3,271 \cdot 10^5$ Н·м. Величина разрушающего момента $M_{разр} = 4,375 \cdot 10^5$ Н·м. Следовательно,

$$\beta = \frac{M_{разр}}{M_T} = 1,338. \text{ Величина разрушающей}$$

нагрузки в виде равномерно распределённой нагрузки, действующей по всей длине

стержня, $q = \frac{8 \cdot M_{разр}}{l^2} = 9,722 \cdot 10^4$ Н/м. Границы упругого и упругопластического

участков стержня определяются координатами: $z_{лев} = 1,493$ м, $z_{прав} = 4,507$ м.

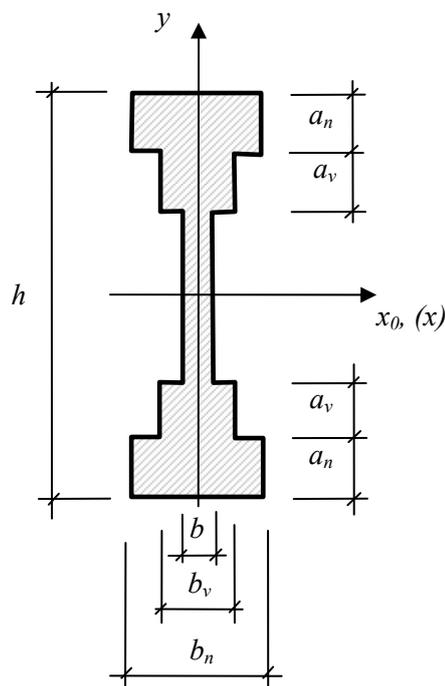


Рис. 3

При определении границы между зонами упругого и пластического деформирования вычислялись статические моменты сжатой и растянутой пластических зон поперечного сечения, а также момент инерции упругого ядра относительно нейтральной оси как функции высоты упругого ядра. При этом, исходя из геометрии поперечного сечения, рассматривалось три случая: а) граница упругой и пластической зон находится в пределах стенки поперечного сечения; б) граница упругой и пластической зон находится в пределах внутренней полки поперечного сечения; в) граница упругой и пластической зон находится в пределах внешней полки поперечного сечения. Затем, задавая высоту упругого ядра h^Y , на основании формулы (4) определяли соответствующую координату z границы между зонами упругого и пластического деформирования.

Граница между зонами упругого и пластического деформирования по длине стержня показана на рис. 4.

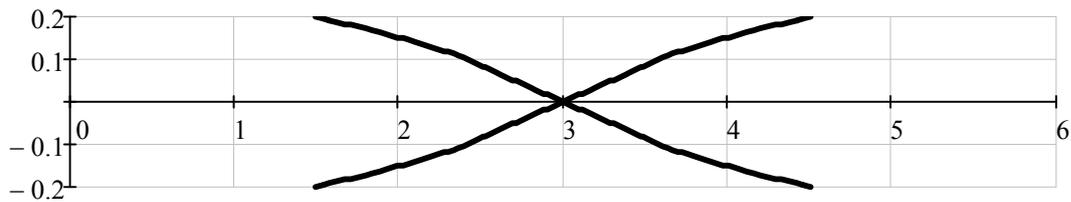


Рис. 4

Построение аналитического выражения для функции $h^Y = h^Y(z)$ — высоты упругого ядра — выполнялось с помощью кубической сплайн-интерполяции. На рис. 5 показан график $h^Y = h^Y(z)$, построенный по точкам в соответствии с рис. 4.

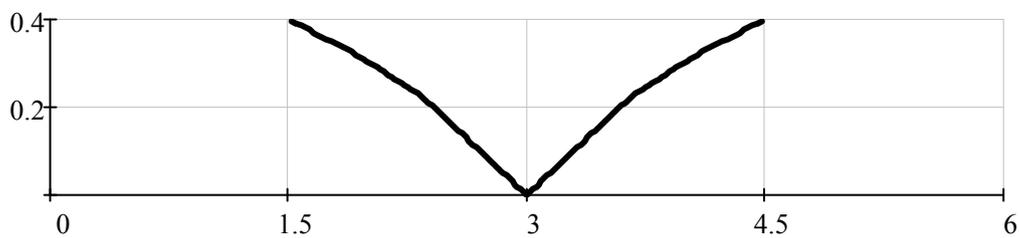


Рис. 5

На рис. 6 представлен график $h^Y = h^Y(z)$, аппроксимированный кубическими сплайнами. При наложении этих графиков друг на друга они совпадают.

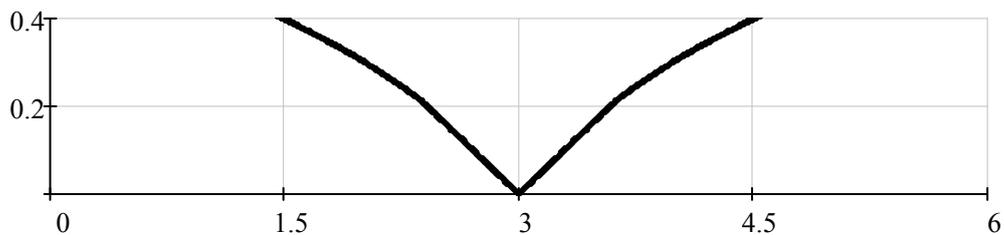


Рис. 6

На рис. 7 изображена эпюра нормальных напряжений в сечении $z = 2,014$ м, то есть там, где пластические деформации развиваются лишь в пределах внешней полки. Эпюра нормальных напряжений на рис. 7 построена в соответствии с соотношениями (6) и (7). На рис. 8 показана соответствующая эпюра остаточных нормальных напряжений, построенная по соотношению (12). На рис. 9 приведена эпюра остаточных нормальных напряжений в опасном сечении стержня при $z = 3,0$ м.

На рис. 10 изображена эпюра касательных напряжений в поперечном сечении в зоне упругих деформации ($z = 1,493$ м), на рис. 11 – эпюра касательных напряжений в сечении $z = 2,014$ м, построенная в соответствии с соотношениями (8) и (9); эпюра остаточных касательных напряжений в этом сечении показана на рис. 12.

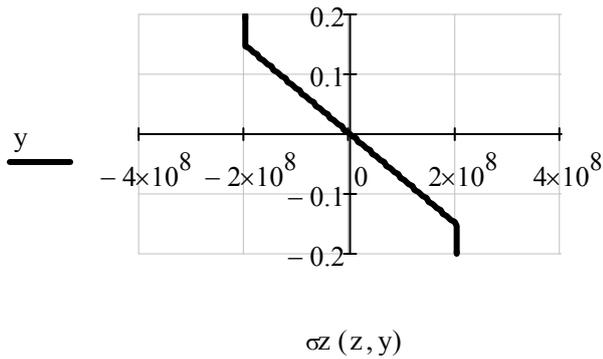


Рис. 7

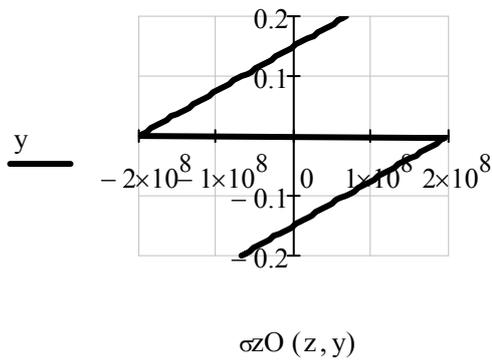


Рис. 8

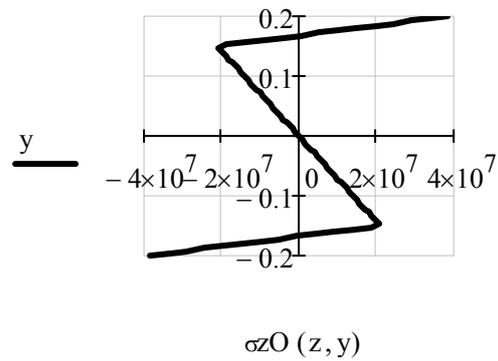


Рис. 9

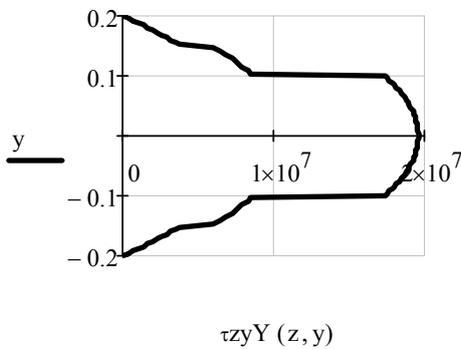


Рис. 10

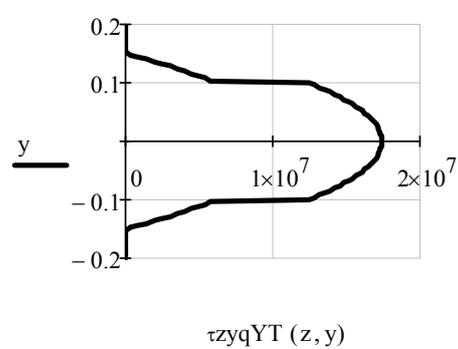
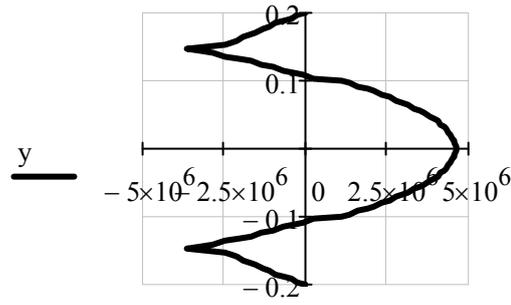


Рис. 11

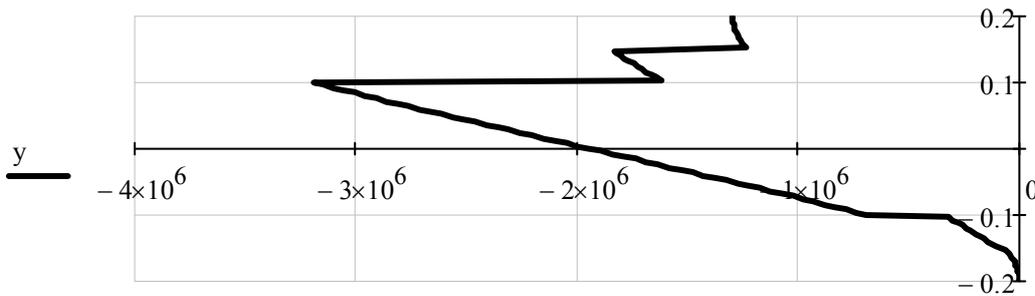


$\tau_{zy}O(z, y)$

Рис. 12

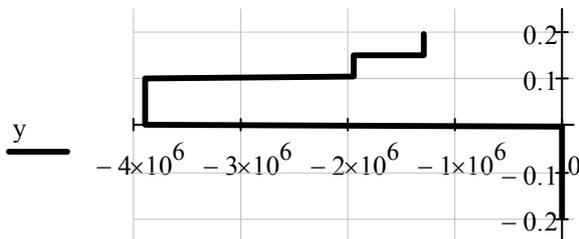
В ходе исследований установлено, что касательные напряжения в зоне упругопластических деформаций монотонно убывают по мере приближения рассматриваемого сечения к опасному сечению, одновременно зона их действия сужается. В опасном сечении, там, где пластические деформации охватывают всю высоту сечения, касательные напряжения равны нулю.

Эпюра нормальных напряжений на горизонтальных площадках в зоне упругих деформаций ($z = 1,493$ м) представлена на рис. 13.



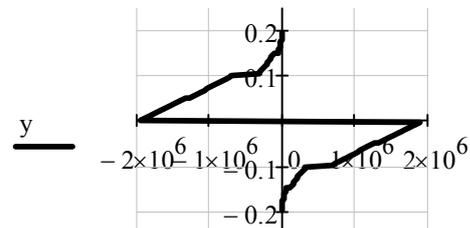
$-\sigma_y Y(z, y)$

Рис. 13



$-\sigma_y(y)$

Рис. 14



$-\sigma_y O(z, y)$

Рис. 15

Так как в зоне пластических деформаций касательные напряжения равны нулю, то в опасном сечении ($z = 3,0$ м) эпюра напряжений на горизонтальных площадках, полученная путём предельного перехода, будет иметь вид, показанный на рис. 14. Эпюра остаточных нормальных напряжений на горизонтальных площадках в опасном сечении стержня, подсчитанная в соответствии с соотношением (14), изображена на рис. 15.

Построение эпюры прогибов, а также эпюры остаточных прогибов стержня после его полной разгрузки выполнялось методом непосредственного интегрирования дифференциального уравнения оси изогнутого стержня. При этом на стержне выделялось три участка: левый упругий участок ($0 \leq z \leq z_{\text{лев}} = 1,493$ м); упругопластический участок ($z_{\text{лев}} = 1,493$ м $\leq z \leq z_{\text{прав}} = 4,507$ м); правый упругий участок ($z_{\text{прав}} = 4,507$ м $\leq z \leq l = 6$ м). На левом и правом упругих участках стержня интегрировалось дифференциальное уравнение изогнутой оси упругого стержня $\frac{d^2V(z)}{dz^2} = \frac{M_{x_0}(z)}{EI_{x_0}}$; на упругопластическом участке – дифференциальное уравнение (15)

при построении эпюры прогибов либо дифференциальное уравнение (16) при построении эпюры остаточных прогибов. Постоянные интегрирования определялись из условий на опорах и условий непрерывности перемещений и гладкости изогнутой оси на стыках участков.

На рис. 16 показана эпюра прогибов при загрузке стержня равномерно распределённой нагрузкой, величина которой соответствует образованию шарнира пластичности в опасном сечении.

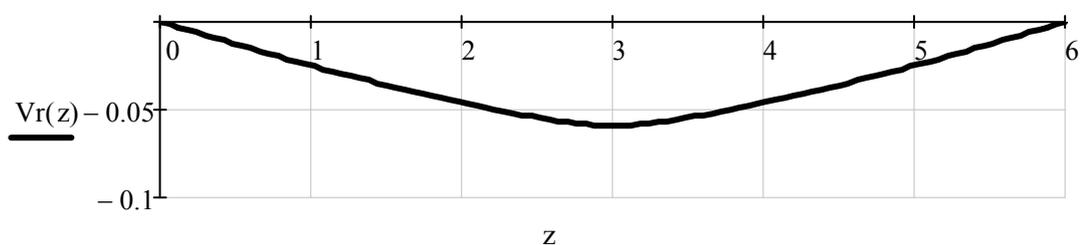


Рис. 16

Величина максимального прогиба $V_{\text{max}} = -0,059$ м.

На рис. 17 приведена эпюра прогибов при нагрузке, соответствующей напряжениям в фибровых волокнах, равным пределу текучести.

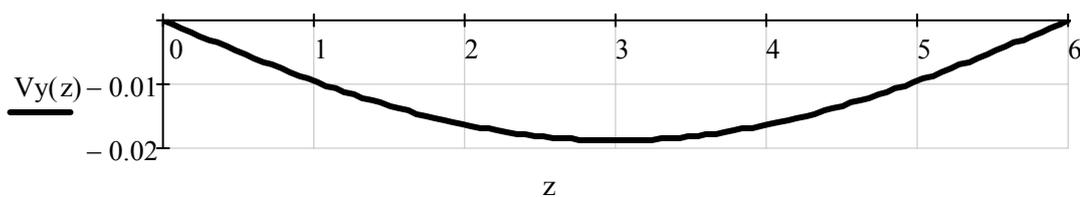


Рис. 17

Величина максимального прогиба $V_{\text{max}} = -0,019$ м.

Эпюра остаточных прогибов после полной разгрузки стержня показана на рис. 18.

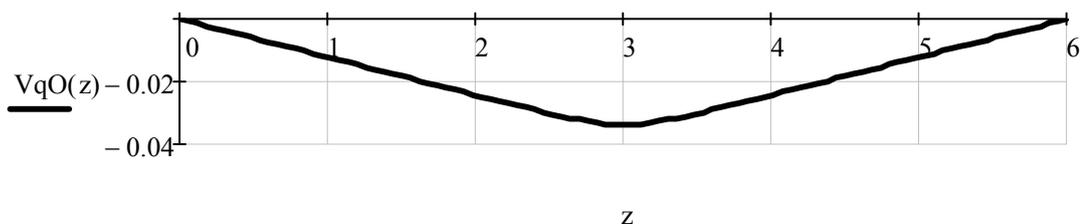


Рис. 18

Величина максимального прогиба $V_{\text{max}} = -0,034$ м.

Заключение. Подводя итог сказанному, следует отметить, что современные информационные технологии, в частности программно-математическое обеспечение персональных компьютеров, позволяют получать решение достаточно сложных, с точки зрения аналитического построения решения, задач в полном объёме.

Список литературы

1. Биргер, И.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
2. Ржаницын, А.Р. Расчёт сооружений с учётом пластических свойств материалов / А.Р. Ржаницын. – 2-е изд., перераб. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1954. – 289 с.
3. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 592 с. (Сер. Механика в техническом университете; Т.2).

References

1. Birger, I.A. Strength of materials: a manual / I.A. Birger, R.R. Mavlûtov. – M.: "Nauka". Ch. Ed. Phys.-math. lit., 1986. – 560 p.
2. Rzhantsyn, A.R. Calculation of structures taking into account elastic properties of materials / A.R. Rzhantsyn. – 2-th Edition. – M.: Gos. izd-vo lit. on construction and architecture, 1954. – 289 p.
3. Feodos'ev, V.I. Strength of materials: course-book for higher schools / V.I. Feodos'ev. – 10-th Edition. and extras. – M.: Izd-vo MGТУ, Moscow, Russia. Bmstu, 1999. – 592 pp. (series of Mechanics at the Technical University; vol. 2).

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

Вдовин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Мухаев Александр Иванович,
старший преподаватель кафедры
«Экспертиза и управление
недвижимостью»
E-mail: alexir-m@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Vdovin Vyacheslav Mihailovich,
Candidate of Sciences, Professor of the
department «Building construction»

Muhaev Alexander Ivanovic,
Senior Lecturer of the department
«Examination and management of real estate»
E-mail: alexir-m@mail.ru

Ariskin Maxim Vasilevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building construction»
E-mail: m.v.ariskin @ mail.ru

К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОЕДИНЕННЫХ ЦЕНТРОВЫМИ ВКЛЕЕННЫМИ ШПОНКАМИ

В.М. Вдовин, А.И. Мухаев, М.В. Арискин

Дается оценка напряженно-деформированного состояния работы клеиметаллического соединения деревянных конструкций с применением центровых клеенных кольцевых шпонок. Приводятся графики распределения нормальных и касательных напряжений в деревянном элементе с клеенной шпонкой при действии на неё усилий от центрального соединительного болта.

Ключевые слова: деревянные конструкции, клеевые соединения, шпонка, разрушающая нагрузка.

TO THE ESTIMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF WOODEN ELEMENTS CONNECTED BY PIVOT GLUED DOWELS

V.M. Vdovin, A.I. Muhaev, M.V. Ariskin

The evaluation of the stress-strain state of glued metal connection of wooden structures using pivot ring glued dowels is presented. The diagrams of distribution of normal and shear stresses in a wooden cell with a glued dowel under the influence of its centering connecting bolt are given.

Keywords: wooden structures, joints, glue, dowel, the breaking load.

В середине прошлого столетия в практике строительства достаточно широко применялись соединения деревянных конструкций на кольцевых металлических шпонках. Такие соединения отличались высокой несущей способностью и могли передавать на сравнительно небольшой контактной площади от одного соединяемого элемента другому значительные усилия. В дальнейшем авторами [1] обычные соединения на кольцевых шпонках были усовершенствованы и предложены соединения на клеенных металлических кольцевых шпонках, которые позволили ещё более увеличить несущую способность и снизить податливость клеешпоночного соединения.

Однако недостатком соединений на клеенных кольцевых шпонках является то, что они могут выполняться только в заводских условиях, в процессе изготовления самой несущей конструкции. Это связано с тем, что кольцевая шпонка на половину своей ширины вставляется в один соединяемый элемент, а другая половина должна

располагаться в другом элементе. Учитывая то, что операции с клеевыми композициями должны проводиться в нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. в приближенных к заводским, то и все работы по изготовлению соединений должны выполняться на технологических линиях заводов-изготовителей.

Практика строительства нуждается в соединениях сборно-разборных, когда процесс сборки конструкций осуществляется на строительной площадке. С этой целью предложено соединение на центральных клеенных металлических шпонках. Описание предлагаемого соединения и результаты экспериментальных исследований приведены в работе [2]. Как показали результаты испытаний [2], клеенная центровая шпонка обладает достаточно большой несущей способностью. Экспериментально показано также, что несущая способность шпонки существенно зависит от её параметров: диаметра и ширины. Однако проведенные эксперименты дали лишь предельную разрушающую нагрузку на образец, без анализа действительной работы деревянного элемента и его напряженного состояния. Учитывая определенную сложность проведения натуральных физических испытаний по выявлению действительного напряженного состояния деревянного элемента с клеенной в него металлической шпонкой, приведем ход исследования по решению этой проблемы.

Теоретические исследования проводились с целью:

1. Получить картину и характер действительного напряженно-деформированного состояния (НДС) деревянного элемента с центровыми клеенными кольцевыми шпонками.

2. Оценить НДС и выявить зависимость его от диаметра и ширины шпонки.

3. Оценить влияние на НДС способа передачи нагрузки на соединяемый образец.

В основе рассматриваемого соединения лежит деревянный элемент (брус или доска) с клеенными в него с двух противоположных сторон центровыми клеюльцевыми шпонками (ЦККШ). Усилия на элемент передаются сдвиговыми силами, действующими непосредственно на шпонку через соединительный болт. В общем случае в соединении могут быть либо один, либо несколько элементов с ЦККШ, навешиваемыми на один соединительный болт. Для достижения поставленных целей ограничимся изучением НДС одного деревянного элемента.

Следует учесть, что дерево по своему физико-анатомическому строению является ортотропным материалом, а клеенная металлическая шпонка – изотропным. Кроме того, благодаря их монолитной склейке, следует учесть, что шпонки передают усилие от соединительного болта деревянному элементу не только по периметру контакта, но и по древесине, находящейся во внутренней части кольца. Характер действия всех этих контактных усилий неизвестен и составляет предмет исследований.

Шпонки клеены только на часть толщины соединяемого элемента, что накладывает дополнительные ограничения и условия на все виды напряжений, поэтому необходимо учитывать характер действия напряжений не только по длине и ширине деревянного элемента, но и по толщине. Это вызывает необходимость решать пространственную задачу, в которой интерес представляет характер распределения напряжений в трёх измерениях.

В общем случае, в зависимости от способа передачи нагрузки на образец, расчетная схема соединения может быть представлена согласно рис.1 и 2.

На рис.1 показан образец при передаче действующей нагрузки через металлическую раму, что имитирует в натуре соединение с металлическими накладками.

На рис.2 показано соединение трех деревянных элементов, имеющих ЦККШ. Все эти три элемента навешаны на один центровой болт.

Шпонки монолитно клеены в деревянный элемент и поэтому до определенного момента нагружения образца они работают совместно с древесиной, т.е. по всему контуру шпонки могут возникать как растягивающие, так и сжимающие напряжения (связь шпонок с древесиной двусторонняя).

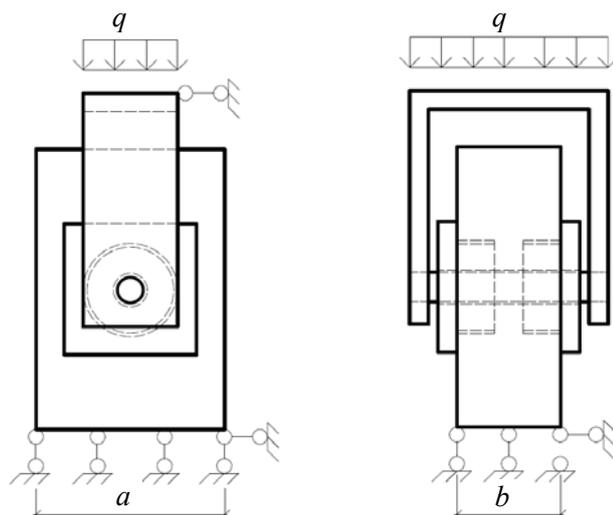


Рис. 1. Расчетная схема соединения на ЦККШ при передаче нагрузки через металлическую раму

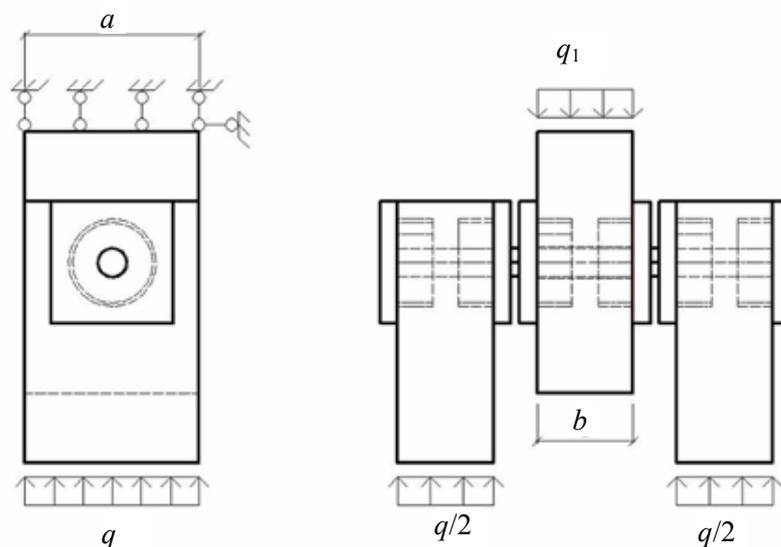


Рис. 2. Расчетная схема соединения на ЦККШ при передаче нагрузки через трехсоставной элемент

При определенном уровне нагружения растянутые связи между шпонкой и древесиной теряют прочность (шпонка получила сдвиг), тогда совместная работа шпонок с древесиной обеспечивается только сжимающими контактными напряжениями. Это другая постановка задачи.

Образец, работающий под воздействием нагрузки, оказывается в условиях объёмного напряжённого состояния, которое характеризуется шестикомпонентным вектором напряжений: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$.

Решение такой задачи в аналитическом виде, т.е. точными методами теории упругости анизотропного тела, затруднительно, поэтому принят один из численных методов, а именно метод конечных элементов, точность которого для поставленных целей задачи вполне достаточна.

Монолитность соединения принятой модели математически описывалась связыванием соответствующих узлов по всем степеням свободы.

Все расчеты были выполнены в программном комплексе ANSYS. Комплекс обладает разными возможностями конечно-элементного анализа. Процедура расчета разделена на четыре основных этапа:

- построение модели;
- разбивка модели на сетку конечных элементов;
- приложение нагрузки (включая и граничные условия) и получение решения;
- анализ результатов.

Построение модели включает определение типов конечных элементов, их констант, свойств материалов и геометрии модели.

Для моделирования металлической шпонки и деревянного элемента был использован конечный элемент Solid92 (рис.3).

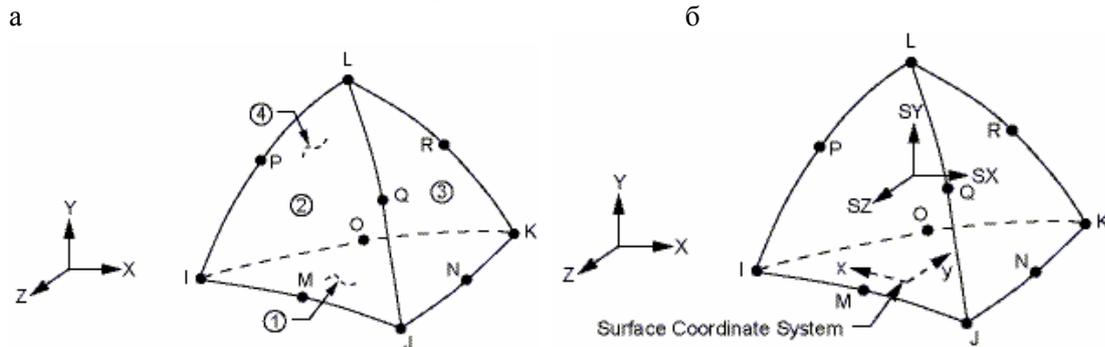


Рис. 3. Вид конечного элемента Solid92:
а – конечный элемент Solid92; б – выдача усилий в элементе Solid92

Конкретные материалы соединения учтены введением деформационных характеристик для изотропного тела (металлическая шпонка и стяжной болт) и для ортотропного (деревянный элемент).

Для расчетов принята разбивочная сетка МКЭ, изображенная на рис.4. Основной целью на этапе разработки геометрической модели является создание адекватной конечно-элементной модели, состоящей из узлов и элементов. Эта часть задачи выполнялась поэтапно для металлических частей соединения и деревянного образца (рис. 4. а,б,в).

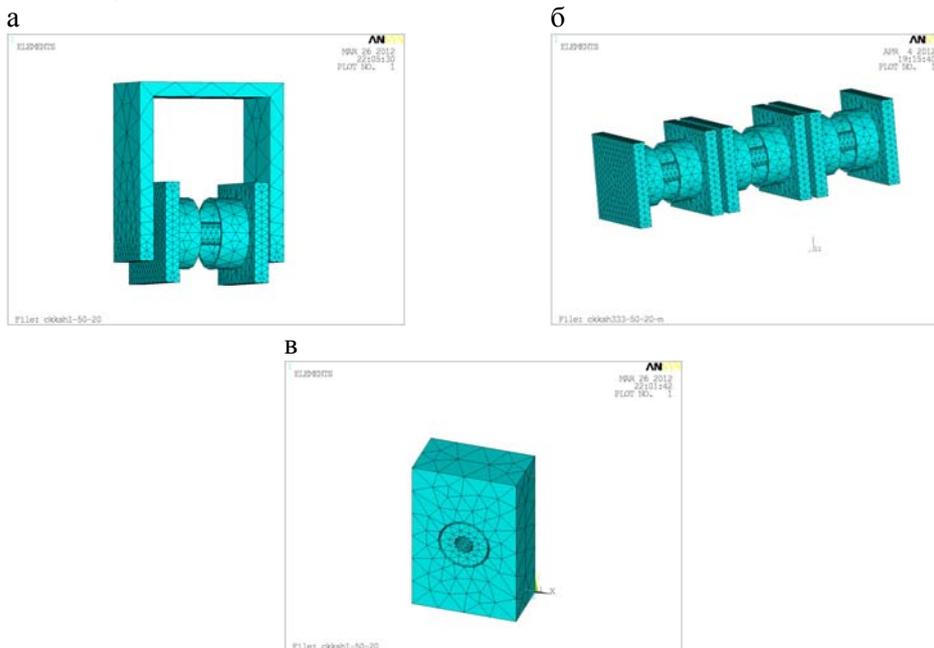


Рис. 4. Разбивка на сетку конечных элементов металлических частей:
а – образец с металлической рамой; б – трехсоставной образец; в – деревянный образец

Приложение нагрузки осуществлялось согласно расчетной схеме (рис.1). Расчет производился на действие нагрузки $P=5$ кН при следующих исходных данных материалов:

- металла $E_x=210000$ МПа, $\mu=0,3$;
- древесины $E_x=16000$ МПа, $\mu_{yx}=0,5$;
 $E_y=1000$ МПа, $\mu_{zy}=0,2$; $E_z=500$ МПа, $\mu_{zx}=0,2$;
 $G_{xy}=1180$ МПа, $G_{yz}=690$ МПа, $G_{xz}=670$ МПа.

Параметры образцов заимствованы из экспериментальных исследований [2], некоторые из них приведены в таблице.

Параметры образцов на ЦККШ

Марка образца	$D_{шп}$, ММ	$t_{шп}$, ММ	$b_{шпшп}$, ММ	C , ММ	$b_{обр}$, ММ	S_1 , ММ	S_2 , ММ	q , МПа
ЦККШ50-20	50	2	20	55	100	75	50	0,91
ЦККШ60-20	60	2	20	55	120	90	60	0,91
ЦККШ60-30	60	3	30	75	120	90	60	0,55

Результаты расчетов

Результаты компьютерных расчетов по программе ANSYS при вышеописанных данных приведены на рис.5.

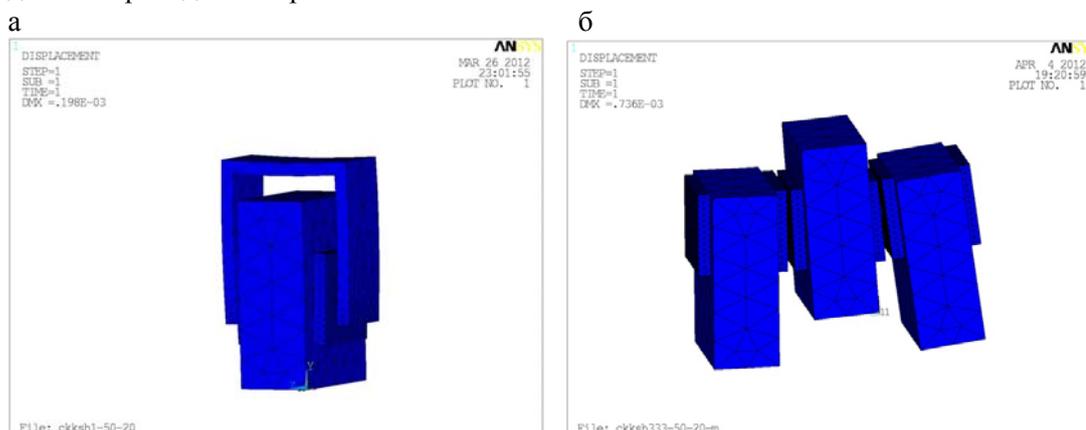


Рис. 5. Общий вид деформаций образца:

а – образец с металлической рамой; б – трехсоставной образец

Программа позволяет выполнить не только операции по нахождению напряжений и перемещений, но и строить графики их изменений по рассматриваемым сечениям. Для определения локальных зон распределения напряжений были выбраны наиболее опасные (на наш взгляд) сечения в деревянном элементе, по которым были построены эпюры нормальных и касательных напряжений. На рис.6 показаны эти сечения.

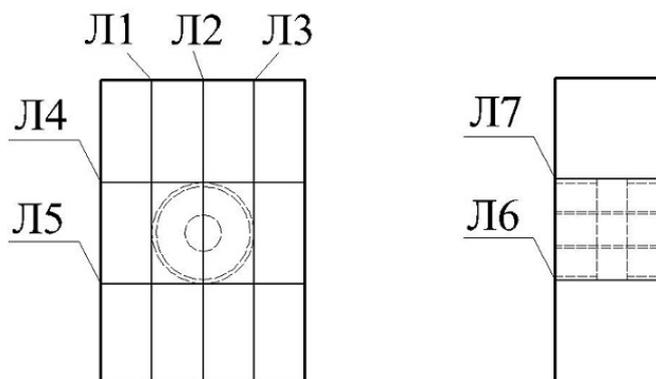


Рис. 6. Возможные опасные сечения

Выявлено, что наиболее опасными сечениями являются Л1, Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, Л7. На рис.7–14 приведены эпюры нормальных и касательных напряжений по некоторым из этих линий для образцов ЦККШ-50-20 и ЦККШ-60-20.

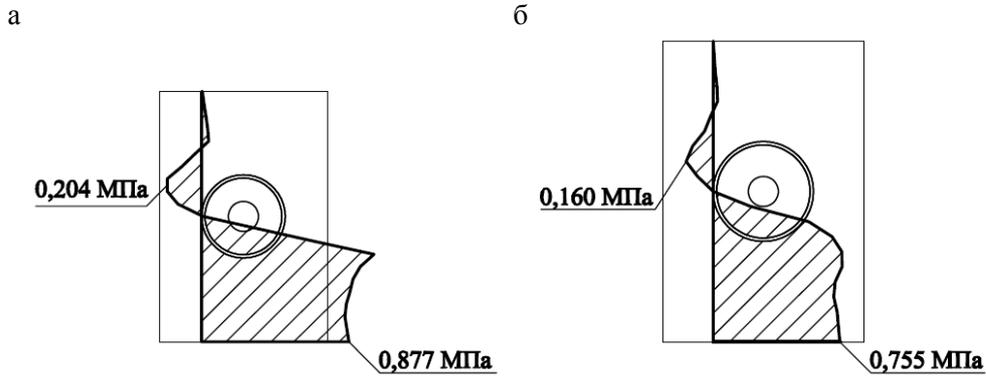


Рис. 7. Эпюры напряжений σ , по линии Л1:
а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

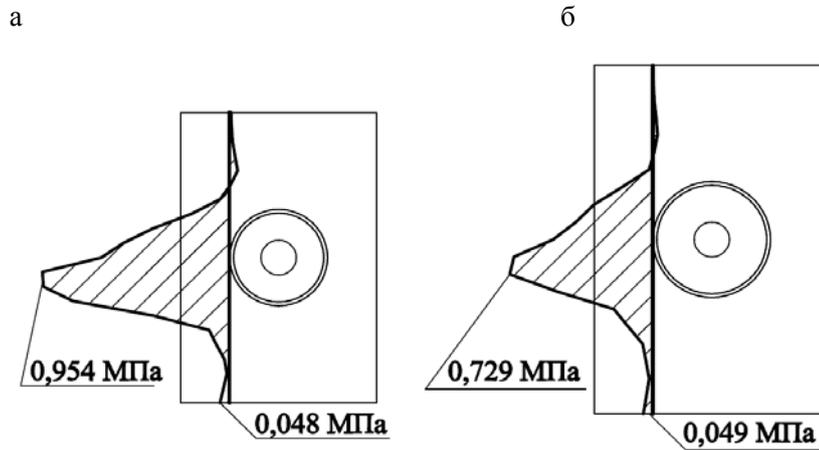


Рис. 8. Эпюры напряжений τ_{xy} , по линии Л1:
а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

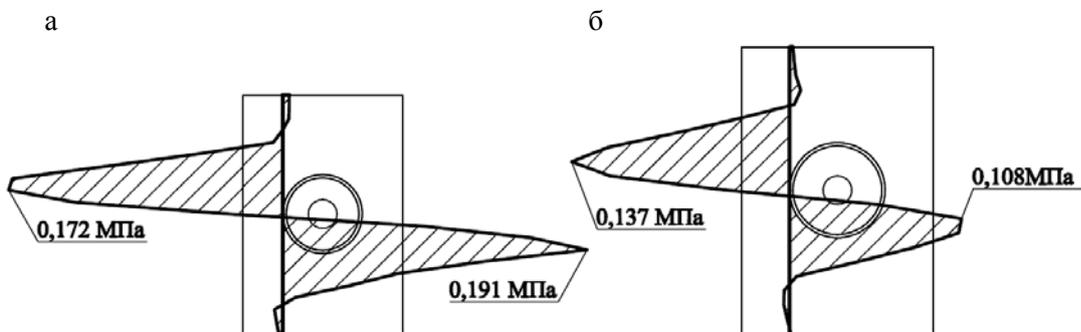


Рис. 9. Эпюры напряжений τ_{xz} , по линии Л1:
а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

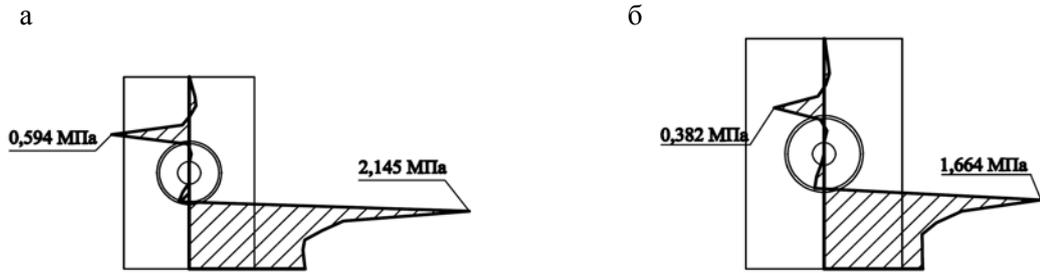


Рис. 10. Эпюры напряжений σ_y по линии Л2:
 а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

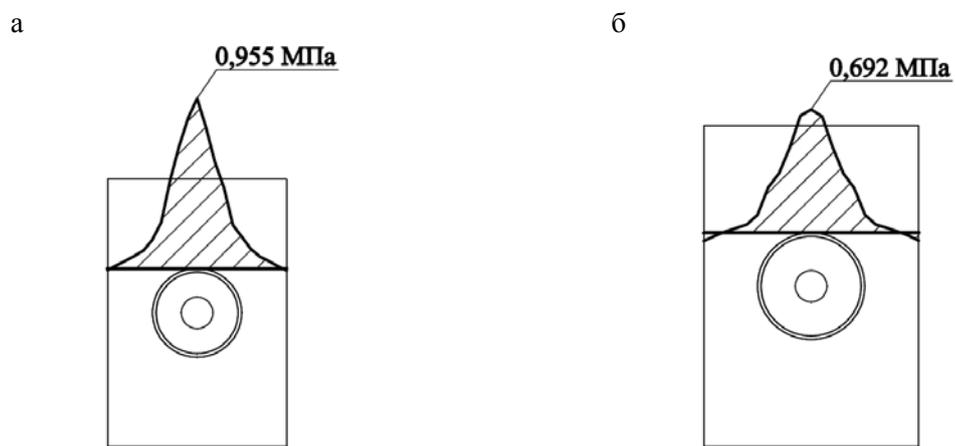


Рис. 11. Эпюры напряжений σ_y по линии Л4:
 а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

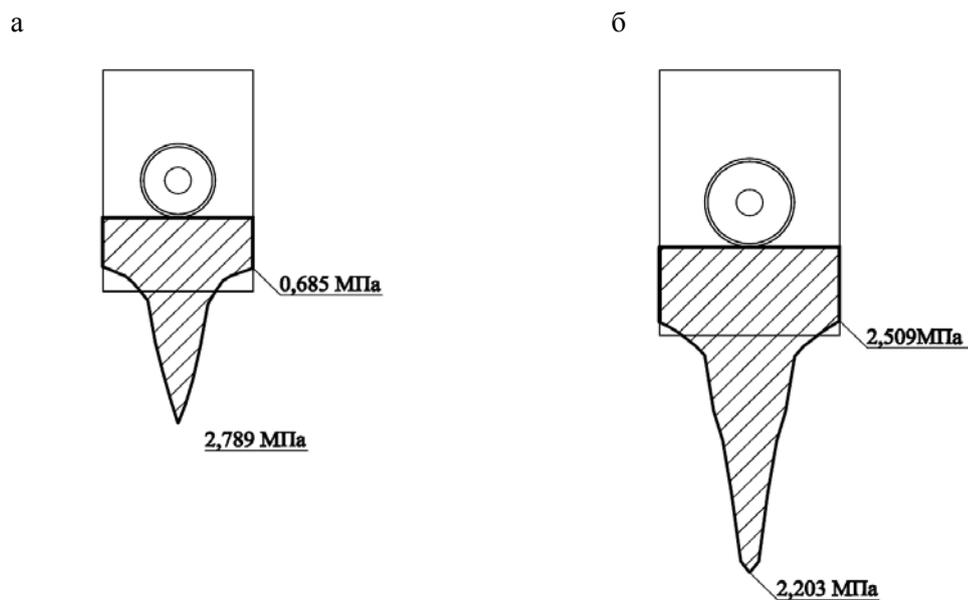


Рис. 12. Эпюры напряжений σ_y по линии Л5:
 а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

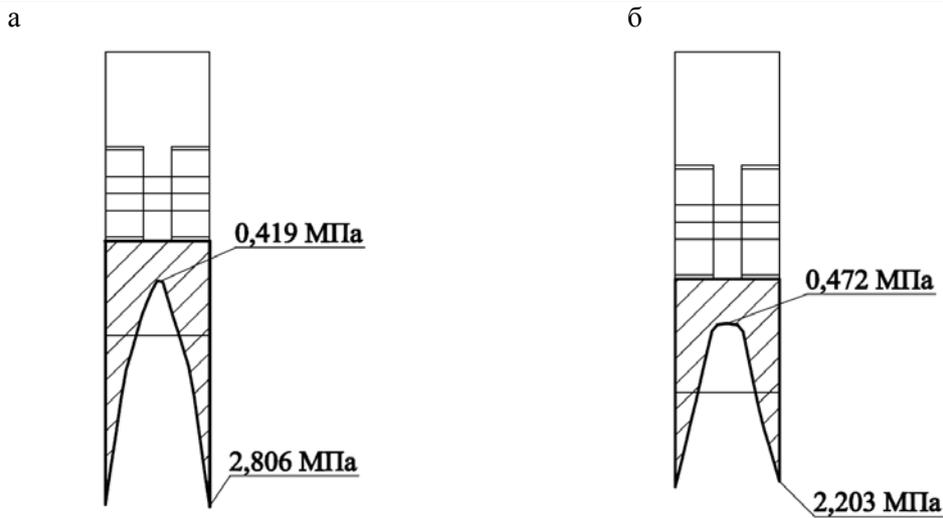


Рис. 13. Эпюры напряжений σ_y по линии Л6:
 а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

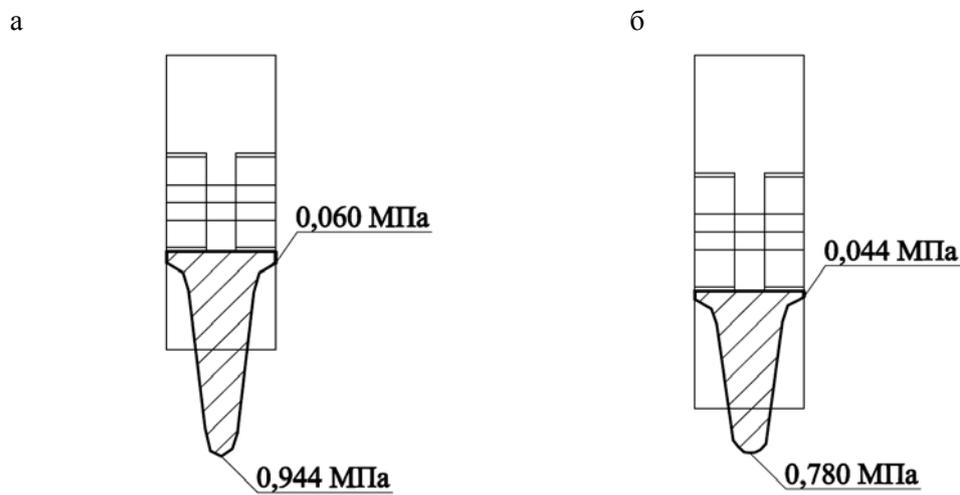


Рис. 14. Эпюры напряжений σ_z по линии Л6:
 а – образец ЦККШ-50-20; б – образец ЦККШ-60-20

Из опасных сечений (см. рис.6) были выбраны максимальные напряжения во всех рассчитанных образцах и по их значениям построены зависимости максимальных напряжений от диаметра шпонки и её ширины (рис. 15–18).

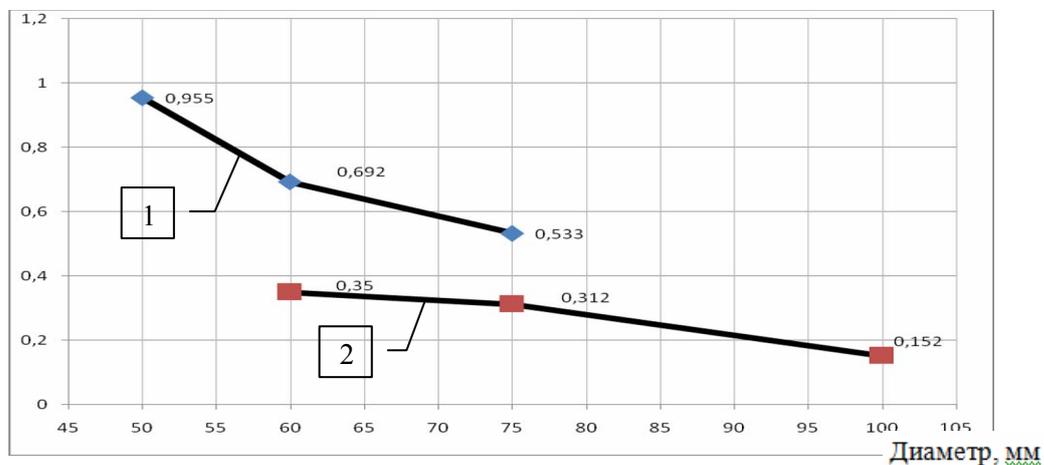
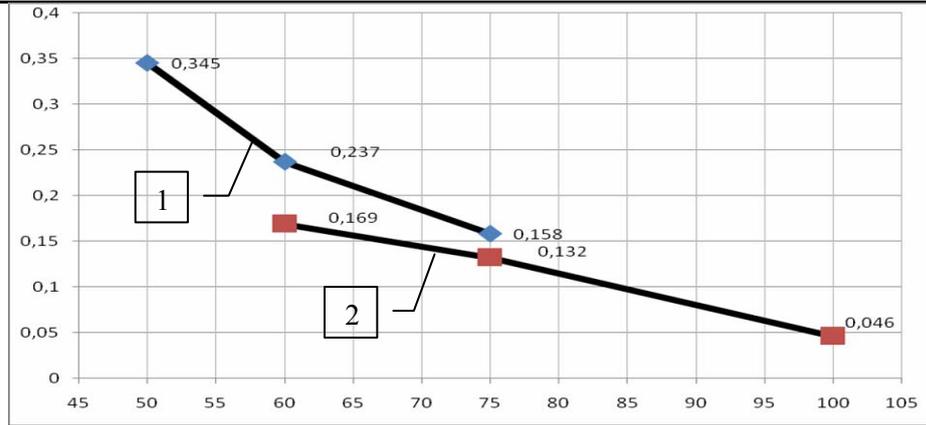
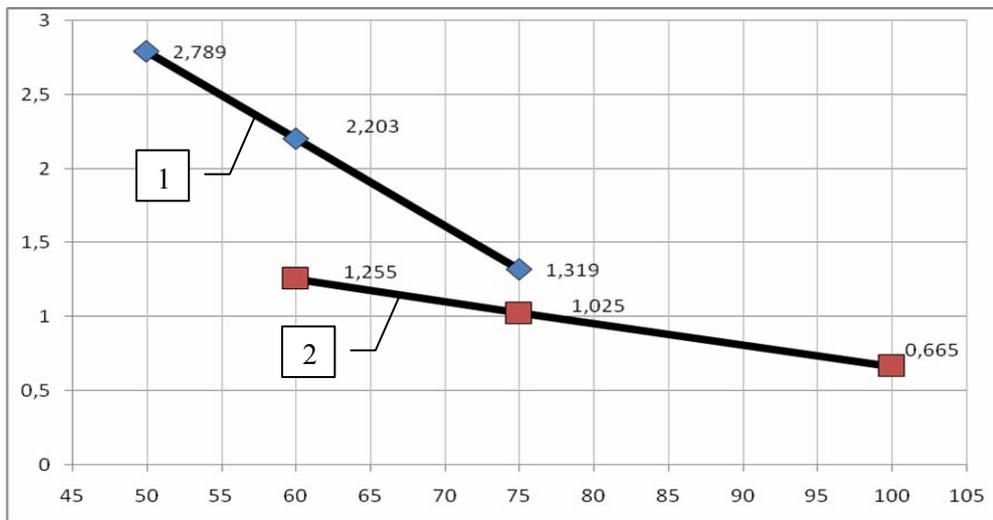


Рис.15. Зависимость нормальных напряжений σ_y по линии Л4 от диаметра:
 1 – образцы с шириной шпонки 20 мм; 2 – образцы с шириной шпонки 30 мм



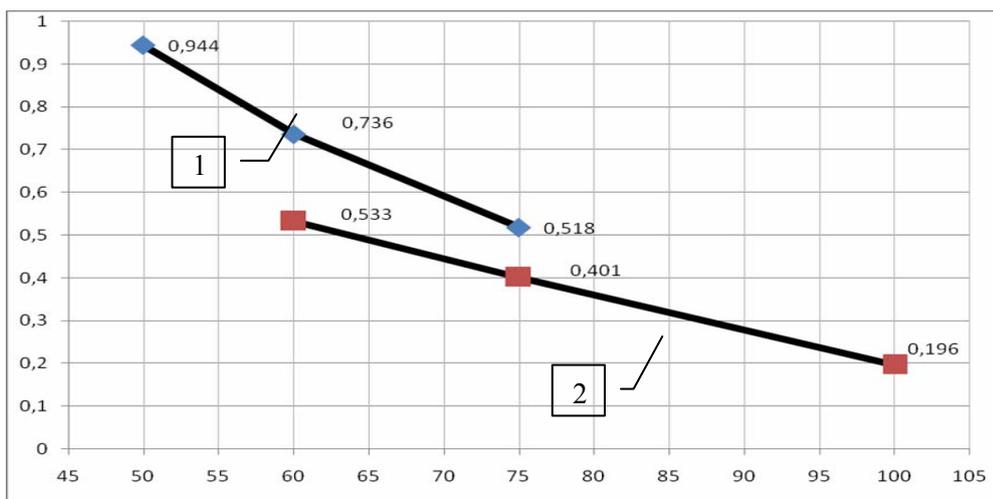
Диаметр, мм

Рис.16. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} по линии Л4 от диаметра: 1 – образцы с шириной шпонки 20 мм; 2 – образцы с шириной шпонки 30 мм



Диаметр, мм

Рис.17. Зависимость нормальных напряжений σ , по линии Л5 от диаметра: 1 – образцы с шириной шпонки 20 мм; 2 – образцы с шириной шпонки 30 мм



Диаметр, мм

Рис.18. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} по линии Л5 от диаметра: 1 – образцы с шириной шпонки 20 мм; 2 – образцы с шириной шпонки 30 мм

Из рисунков видно, что при увеличении диаметра и ширины шпонки максимальные значения напряжений уменьшаются. Это говорит о том, что несущая способность соединения на клеенных металлических шпонках существенно зависит от этих параметров, что подтверждается результатами проведенных экспериментов [2].

Список литературы

1. Вдовин, В.М. Вклеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011.
2. Вдовин, В.М. Вклеенные центровые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, А.И. Мухаев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2.

References

1. Vdovin, V.M. Pasted-ring keys in the compounds of wooden structures: monogr. / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Galakhov. – Penza: PGUAS, 2011.
2. Vdovin, V.M. Pasted-centering dowels in the joints of wooden structures / V.M.Vdovin, A.I. Muchaev // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 2.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.356.3

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

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
Тел. 95-92-08 (доп. 11-88), 89063965775
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы»

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»

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

Grishin Boris Mikchailovich,
Doctor of Sciences, Head of the department
«Water supply, sewerage and hydraulic
engineering»
Tel.: 95-92-08 (доп. 11-88), 89063965775
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Koshev Alexander Nikolaevich,
Doctor of Chemistry Science, Professor
of the department «Information and computer
systems»

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building constructions»

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Water supply, sewerage
and hydraulic engineering»

УДАЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКИСЛИТЕЛЕЙ

Б.М. Гришин, А.Н. Кошев, Н.Н. Ласьков, М.В. Бикунова

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований предварительной очистки сточных вод от соединений азота с использованием хлора и кислорода. Разработанная технология удаления аммонийного азота позволяет улучшить работу биологических очистных сооружений.

Ключевые слова: сточные воды, соединения азота, физико-химическая очистка, окислители, биологическая очистка.

AZO COMPOUNDS REMOVAL OUT OF SEWAGE USING OXIDIZERS

B.M. Grishin, A.N. Koshev, N.N. Laskov, M.V. Bikunova

The results of theoretical and experimental investigations of sewage purification from azo compounds using chlorine and oxygen are shown. Elaborated technology of ammonium nitrogen removal allows to improve biological sewage purification works function.

Keywords: sewage, azo compounds, physics-chemical purification, oxidizers, biological purification.

В настоящее время весьма актуальной проблемой является предотвращение антропогенного эвтрофирования водоемов, обусловленного в первую очередь поступлением в них биогенных элементов – азота и фосфора, содержащихся в бытовых и производственных сточных водах.

Следствием эвтрофикации водоемов является массовое развитие планктона, приводящее к существенному ухудшению качества воды, появлению привкусов и запахов, нарушению кислородного режима и экологической обстановки в реках и водохранилищах, что неприемлемо для нормальной жизнедеятельности гидробионтов. В результате возникают дополнительные трудности при очистке воды, используемой для хозяйственно-питьевых целей и производственного водоснабжения.

Как показывает практика, защита водоемов от поступления только соединений фосфора во многих случаях не предотвращает эвтрофирования, для этого необходимо защитить их и от загрязнения веществами, содержащими азот.

Органические и минеральные соединения азота присутствуют в сточных водах многих отраслей промышленности: химической, медицинской, пищевой, агропромышленного комплекса и пр., а также в хозяйственно-бытовых сточных водах. Как правило, эти стоки очищаются от присутствующих в них органических веществ биологическими методами, в то время как соединения азота практически остаются в очищенной жидкости. Требование проведения доочистки биологически очищенных сточных вод от соединений азота предъявляется в настоящее время органами здравоохранения и комитетами природных ресурсов практически повсеместно, а для этого необходимы дополнительные огромные капитальные вложения, что обуславливает остроту проблемы и актуальность ее решения.

Данная статья посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям предварительной физико-химической очистки сточных вод от азотосодержащих соединений с использованием хлора и кислорода воздуха с целью снижения нагрузки по азоту на сооружения биологической очистки.

Городские сточные воды, поступающие на очистные сооружения, характеризуются, как правило, высокими концентрациями аммонийного азота (до 20 мг/л и выше). Одним из методов удаления из воды аммонийного азота является хлорирование до так называемой “точки перегиба” [1]. На рис.1 показан характер влияния аммонийных солей на остаточное содержание введенного в воду хлора [2].

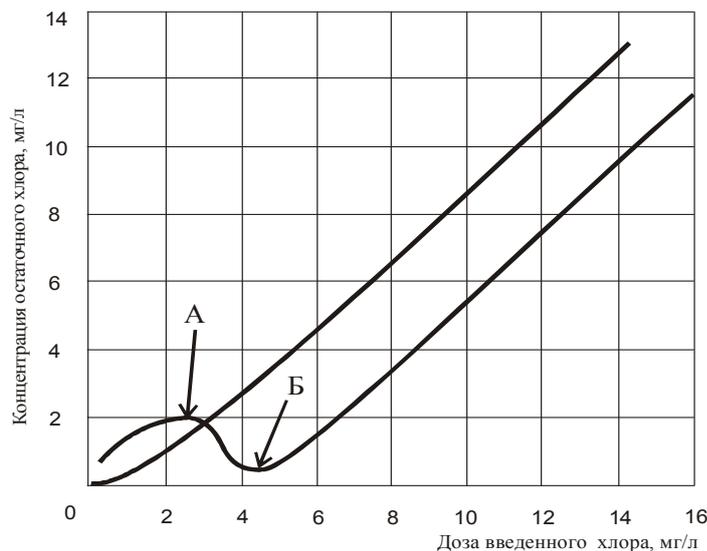
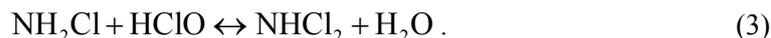
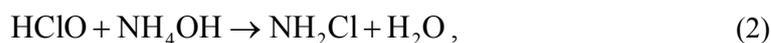
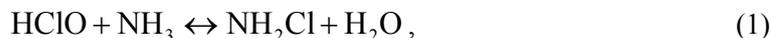


Рис.1. Зависимость остаточного хлора от дозы введенного в воду при отсутствии (1) и при наличии (2) в воде аммонийных солей:
А, Б – точки перегиба

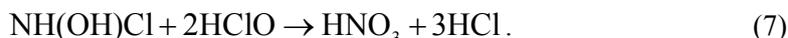
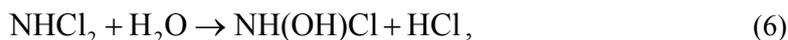
Первая точка перегиба на кривой 2 (точка А) соответствует образованию монохлор-амин NH_2Cl с меньшим, чем у хлора, окислительно-восстановительным потенциалом

Eh. Вторая точка (Б) на кривой соответствует моменту окисления образовавшегося монохлорамина избыточным хлором.

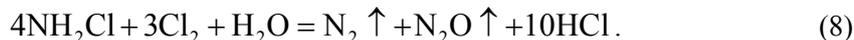
При введении в сточную воду хлора в молярном соотношении $\text{Cl}_2:\text{NH}_4^+ < 1:1$ будут образовываться моно- и дихлорамины. Поэтому на участке кривой до точки А (см. рис.1) весь остаточный хлор связан в хлорамины. Например, при обработке сточной воды хлорноватистой кислотой происходят реакции с аммиаком, аммонийным азотом или органическими солями:



Увеличение дозы хлора и происходящее при этом повышение Eh приводят к тому, что молярное соотношение введенного хлора и содержащегося в воде иона NH_4^+ будет больше единицы, после чего начнется окисление моно- и дихлораминов хлорноватистой кислотой по уравнениям [3]:

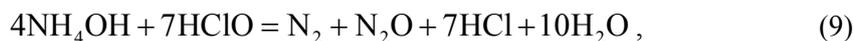


Максимум на кривой остаточного хлора при наличии в воде аммиака (см. рис.1, точка А) отвечает образованию монохлорамина, минимум (точка Б) объясняется окислением последнего избыточным хлором по уравнению



Точка перелома Б (см. рис.1) соответствует молярному соотношению введенного в воду хлора и содержащихся в ней аммонийных солей, равному 2:1 (или 10 мг Cl_2 на 1 мг N в виде NH_4^+).

Оценим процессы протекания реакций (2)–(8) с учетом изменения термодинамического потенциала системы или энергии Гиббса. Рассмотрим реакции взаимодействия растворенных в воде ионов аммония с хлорноватистой кислотой. Отбрасывая стадии образования промежуточных продуктов реакций, с учетом коэффициентов можем записать:



или в ионной форме



Величины изменения энергии Гиббса (ΔG_f^0) при образовании данного вещества из простых веществ, термодинамически устойчивых при давлении 0,1 МПа и температуре 298 К приведены в таблице.

Стандартные термодинамические свойства некоторых ионов и молекул в водном растворе [4]

Ион (молекула)	Изменение энергии Гиббса (ΔG_f^0), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
NH_4^+	-79,5
OH^-	-157,32
H_2O	-237,2
Cl^-	-131,26
ClO^-	-36,61
N_2O	104,12
NH_3	-16,48

Определим изменение энергии Гиббса в реакции (10):

$$\Delta G = [0 + 104,12 + 7 \cdot (-131,26) + 10 \cdot (-237,2)] - [7 \cdot (-36,61) + 4 \cdot (-79,5) + 4 \cdot (-157,32)] = -1983,2 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad (11)$$

Теперь оценим изменение термодинамического потенциала системы при реакции взаимодействия молекул аммиака с хлорноватистой кислотой. С учетом коэффициентов получим:



или в ионной форме



Изменение энергии Гиббса в реакции (13)

$$\Delta G = [0 + 104,12 + 7 \cdot (-131,26) + 6 \cdot (-237,2)] - [7 \cdot (-36,61) + 4 \cdot (-16,48)] = -1915,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad (14)$$

Таким образом, можно считать, что оба процесса являются термодинамически выгодными и единственная проблема при физико-химической очистке стока – это снижение необходимых доз хлора или хлорноватистой кислоты.

Снижение дозы хлорсодержащего реагента может быть достигнуто проведением процесса дезаминирования под давлением и предварительным увеличением Eh среды за счет насыщения воды кислородом воздуха. Подтверждением данной гипотезы служит тот факт, что при обеззараживании воды электролитически полученным раствором гипохлорита натрия активность хлора возрастает при проведении электролиза под давлением 0,3–0,5 МПа [3]. Подобный эффект наблюдается при насыщении воды воздухом в количестве 2–5 % от ее объема при давлении 0,5 МПа с последующей декомпрессией и хлорированием.

Как известно, атмосферный воздух содержит по объему примерно 1/5 часть кислорода и 4/5 части азота, т.е. при общем давлении $1 \cdot 10^5$ Па парциальное давление кислорода будет равно $0,2 \cdot 10^5$ Па. При нормальном давлении при $t=20$ °С в 1 литре воды может раствориться 31,7 мл кислорода [4]. Следовательно, при давлении $0,2 \cdot 10^5$ Па согласно закону Генри должно раствориться $31,7 \cdot 0,2 = 6,34$ мл кислорода, измеренных при давлении $1 \cdot 10^5$ Па, что соответствует его концентрации 9 мг/л. При повышении общего давления до $2 \cdot 10^5$ Па концентрация растворенного кислорода составит 18 мг/л, при $3 \cdot 10^5$ Па – 27 мг/л.

Абсолютное давление $p=(2-3) \cdot 10^5$ Па обычно достигается в трубопроводе, соединяющем канализационную насосную станцию (КНС) перекачки городских сточных вод с приемным резервуаром очистных сооружений. Подача воздуха в трубопровод может быть осуществлена его эжектированием через байпасную линию перекачивающих насосов или с помощью принудительной закачки компрессорами.

Сильная турбулизация потока в рабочем колесе насоса и трубопроводе является дополнительным фактором для более быстрого растворения кислорода в сточной воде и повышения Eh среды.

Для условий повышенных давлений при движении кислородонасыщенной сточной жидкости в трубопроводе запишем выражение для определения изменения энергии Гиббса в виде

$$\Delta G = RT \cdot \lg \frac{C_{p2}}{C_{p1}}, \quad (15)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R=8,314 \frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{град})}$; T – абсолютная температура, К; C_{p1} – предел растворимости кислорода в сточной воде при абсолютном давлении $1 \cdot 10^5$ Па (атмосферном давлении), мг/л; C_{p2} – предел растворимости кислорода в сточной воде при абсолютном давлении $p_2 > 1 \cdot 10^5$ Па.

Графики зависимостей изменения энергии Гиббса от соотношения $\frac{C_{p2}}{C_{p1}}$ при различных температурах показаны на рис.2.

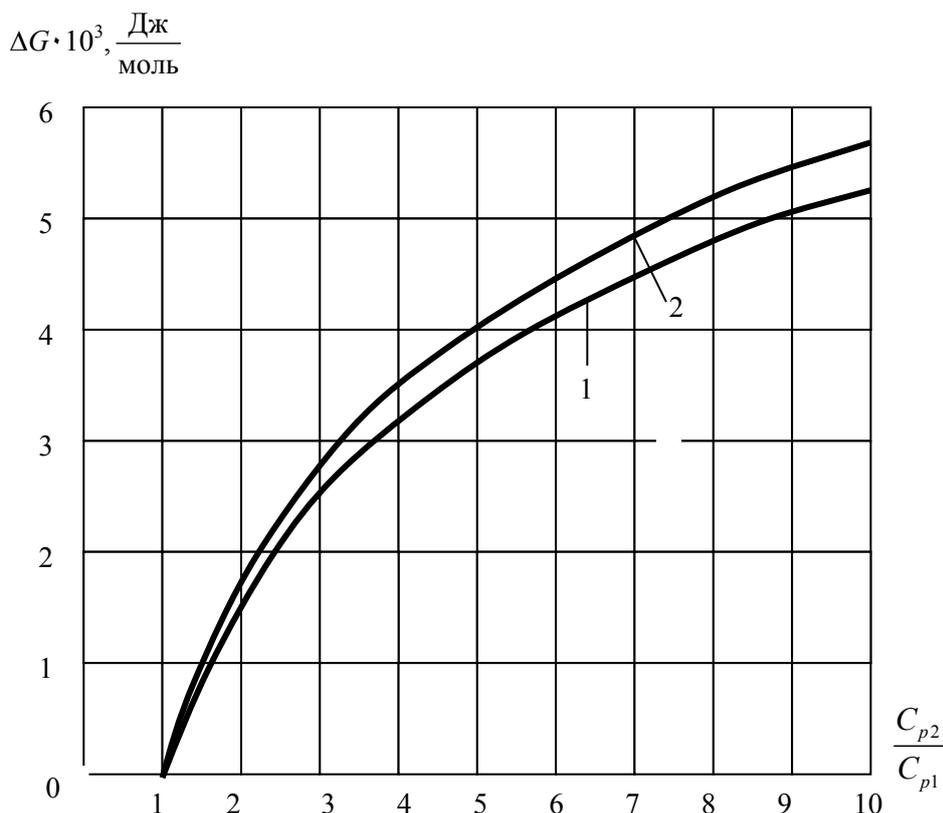


Рис.2. Графики зависимостей ΔG от соотношения $\frac{C_{p2}}{C_{p1}}$ при различных температурах:

1 – при $t=283$ К (10 °С); 2 – при $t=303$ К (30 °С)

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод о том, что увеличение давления в трубопроводе при транспортировке кислородонасыщенной сточной жидкости повышает абсолютную величину температуры и тем самым способствует более быстрому протеканию реакций удаления азота при последующем хлорировании

воды. Объектом экспериментальных исследований являлись сточные воды г.Заречного Пензенской области, которые представляют собой смесь хозяйственно-бытовых, производственных и ливневых стоков. Производственные стоки образованы от предприятий энергетики, пищевой промышленности, машиностроения. В связи с большим процентным содержанием хозяйственно-бытовых сточных вод состав городского стока отличается относительным постоянством в течение года.

Содержание ионов NH_4^+ в сточных водах в период экспериментов изменялось от 10,6 до 23,2 мг/л.

Лабораторные исследования проводились на опытной установке, которая была смонтирована в лаборатории на канализационных очистных сооружениях (КОС) г. Заречного Пензенской области.

Экспериментальные исследования проводились в 2 этапа. На первом этапе хлорная вода добавлялась непосредственно в напорный бак со сточной водой, смесь выдерживалась при избыточном давлении $p_{\text{изб}} = 1 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$ Па в течение 1-2 мин с дальнейшей подачей кислорода воздуха.

Отбор проб на анализ производился через 3 минуты после насыщения смеси кислородом. Графики изменения концентрации аммонийных ионов при вводе хлорсодержащих реагентов в сток до его компрессии и насыщения кислородом воздуха показаны на рис. 3.

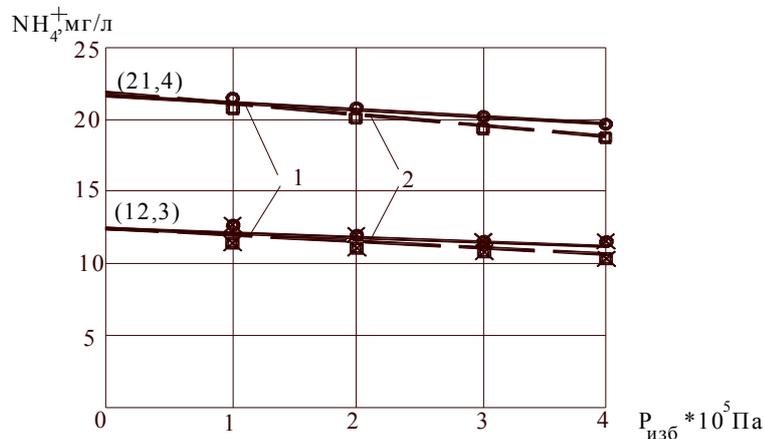


Рис.3. Графики изменения концентрации аммонийного азота в кислородонасыщенной сточной воде при различных значениях $p_{\text{изб}}$ и вводе хлора до напорного бака в дозах:

1 – $D_{\text{хл}} = 5$ мг/л; 2 – $D_{\text{хл}} = 10$ мг/л

Для сточной жидкости, обработанной хлорной водой и кислородом при повышенных давлениях величины Eh изменялись в зависимости от значений $p_{\text{изб}}$ и выбранных доз хлора. При $p_{\text{изб}} = 1 \cdot 10^5$ Па и $D_{\text{хл}} = 5$ мг/л окислительно-восстановительный потенциал был равен +0,18 В, при $p_{\text{изб}} = 4 \cdot 10^5$ Па и дозе хлора $D_{\text{хл}} = 10$ мг/л величина Eh составляла +0,26 В.

Анализируя зависимости, представленные на рис.3, можно сделать вывод о том, что с увеличением избыточного давления от $1 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ Па и дозы хлора от 5 до 10 мг/л происходит пропорциональное снижение концентрации аммонийных ионов в сточной воде, причем наиболее значимое уменьшение содержания ионов NH_4^+ наблюдается при повышенных значениях концентраций аммонийного азота в исходном стоке (на 2,6–2,7 мг/л при $\text{NH}_4^+_{\text{(исх)}} = 21,4$ мг/л и на 1,2–1,8 мг/л при $\text{NH}_4^+_{\text{(исх)}} = 12,3$ мг/л).

На втором этапе исследований хлорная вода с различными дозами вводилась в сточную жидкость после снятия компрессии, проводимой с одновременным насыщением стока кислородом. Параметры компрессии и насыщения сточной воды кислородом воздуха были такими же, как и на первом этапе исследований. Графики изменения концентрации ионов NH_4^+ в стоке при таком виде его обработки приведены на рис. 4.

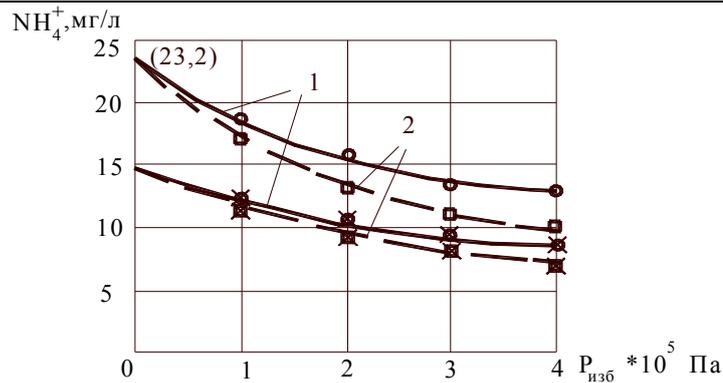


Рис.4. Графики изменения концентрации аммонийного азота в кислородонасыщенной сточной воде при различных значениях $p_{изб}$ и вводе хлора после напорного бака в дозах:

1 – $D_{хл}=5$ мг/л; 2 – $D_{хл}=10$ мг/л

Анализ графиков показывает, что при вводе хлора в сточную воду после ее компрессии с кислородонасыщением происходит значительное снижение концентраций аммонийного азота (на 37–59 % от исходных значений) при давлениях $p_{изб}=(3-4) \cdot 10^5$ Па и дозах хлора $D_{хл}=10$ мг/л; более значимое снижение концентраций ионов NH_4^+ наблюдается при их повышенных исходных значениях в стоке.

Производственные испытания, проведённые на КОС г. Заречного, Пензенской области, показали, что предварительная физико-химическая обработка сточных вод хлором и кислородом с их вводом в напорный коллектор КНС позволяет снизить концентрации в биологически очищенных сточных водах аммонийного азота в 4-4,2 раза, нитритов в 1,4-1,5 раза, нитратов в 1,3-1,5 раза и тем самым улучшить экологическую обстановку в районе сброса стоков в водоём (р. Сура).

Вывод. Предложенная технология предварительной физико-химической обработки сточных вод окислителями позволяет улучшить последующую биологическую очистку стоков от соединений азота и снизить риск эвтрофирования открытых водоёмов.

Список литературы

1. Хаммер, М. Технология обработки природных и сточных вод / М. Хаммер. – М.: Стройиздат, 1979. – 400 с.
2. Фрог, Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 680 с.
3. Кульский, Л.А. Электрохимия в процессах очистки воды / Л.А. Кульский, В.Д. Гребенюк, О.С. Савлук. – Киев: Техника, 1987. – 220 с.
4. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя, А.М.Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.

References

1. Hummer, M. Technology of natural and waste water treatment / M. Hummer. – M.: Construction publishing house, 1979. – 400 p.
2. Frog, B.N. Water treatment / B.N. Frog, A.P. Levchenko. – M.: MSU publishing house, 2003. – 680 p.
3. Koulsky, L.A. Electrochemistry in water purification processes / L.A. Koulsky, V.D. Grebenyuk, O.S. Savluk. – Kiev: Technique, 1987. – 220 p.
4. Short reference book of physics-chemical quantities / Edited by A.A. Ruvdel, A.M. Ponomareva. – L.: Chemistry, 1983. – 232 p.

Московский государственный
машиностроительный университет

Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, 38,
тел.: 8 (495) 223-05-23

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры
«Информационные системы
и дистанционные технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Moscow State University of mechanical
engineering

Russia, 107023, Moscow, 38,
Bolshay Semenovskaya St.,
tel.: 8 (495) 223-05-23

Budylna Evgeniya Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lector of the department
«Informational systems and distance
technology»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ: НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА – ГОРДОНА

Е.А. Будылина

Рассматриваются существенные при моделировании сложных систем различной природы вопросы существования и определения решения задачи Коши для возмущенного уравнения Клейна – Гордона. Дается оценка относительной погрешности решения задачи Коши в полосе при замене возмущенного уравнения Клейна – Гордона невозмущенным.

Ключевые слова: уравнение Клейна – Гордона, существование решения, относительная погрешность приближенного решения, приложения.

SYSTEMS MODELLING: SOME APPLICATIONS OF KLEIN – GORDON EQUATION

E.A. Budylna

Essential questions of the existence and solution of Cauchy's problem for perturbed Klein – Gordon's equation are considered when modelling complex systems of various nature. The assessment of a relative error of the solution of Cauchy's problem in a strip when replacing the perturbed Klein – Gordon's equation with non-perturbed is given.

Keywords: Klein – Gordon's equation, existence questions, relative error of the approximate solution, application.

В настоящее время наблюдается большой интерес к проблеме распространения волн в газожидкостных системах (гидродинамические процессы современной технологии и энергетики, ультразвуковые технологии); реальная жидкость рассматривается двухфазной средой с начальными параметрами газосодержания, соответствующими экспериментальным данным. Используются различные приближенные модели, описывающие движение газожидкостной смеси, в том числе уравнение Клейна – Гордона. На основе этих моделей проводятся изучение акустических свойств жидкостей с пузырьками газа, а также исследование волн конечной амплитуды в смесях с достаточно крупными пузырьками газа. Уравнение Клейна – Гордона применяется и при описании взрывных неустойчивостей поверхности жидкого металла во внешнем электрическом поле, заряженной поверхности диэлектрической жидкости, тангенциального разрыва по механизму Кельвина – Гельмгольца и др.

Известен ряд математических моделей, описывающих нелинейные сейсмические эффекты в геофизических средах (канонические нелинейные уравнения Бусинеска, Бургерса, Кортевега де Фриза, Шредингера), в том числе уравнение синус-Гордона и его модификации. В качестве существенных нелинейностей рассматриваются дисси-

пация и дисперсия – основные характеристики и геофизической среды, и волновых процессов, протекающих в ее пределах.

Нелинейное уравнение Клейна – Гордона

$$z''_{xx}(x,t) - z''_t(x,t) = f(z(x,t)) \quad (1)$$

является одним из классических уравнений теории нелинейных волн (встречается в теории магнетиков, дислокаций, джозефсоновских переходов). Частным случаем является уравнение синус-Гордона

$$z''_{xx}(x,t) - z''_t(x,t) = \sin(z(x,t)). \quad (2)$$

В ряде современных практических применений (например, нестационарный эффект Джозефсона) в левой части уравнения синус-Гордона появляется слагаемое с первой производной по времени (возмущение):

$$z''_{xx}(x,t) - z''_t(x,t) + a \cdot z'_t(x,t) = \sin(z(x,t)) + \sin(3 \cdot z(x,t)). \quad (3)$$

Иногда при малых интервалах времени этим слагаемым пренебрегают, но при больших интервалах времени это может привести к потере решения специального вида – типа *бегущей волны, сглаживающейся на бесконечности* (решение вида $\varphi(x,t) = g(x - v \cdot t)$, отличное от константы; $g(\xi)$ стремится к константам при $\xi \rightarrow +\infty$ и при $\xi \rightarrow -\infty$ $g'(\xi)$ стремится к нулю при $\xi \rightarrow +\infty$ и при $\xi \rightarrow -\infty$; $\lim_{\xi \rightarrow \infty} g(\xi)$ не обязательно равен $\lim_{\xi \rightarrow -\infty} g(\xi)$).

Обширна библиография по исследованию задач о возмущении уединенных волн. Под *уединенной волной* понимается решение вида $\varphi(x,t) = g(x - v \cdot t)$, отличное от константы, если $g(\xi)$ стремится к константам при $\xi \rightarrow \pm\infty$ и $g'(\xi)$ стремится к нулю при $\xi \rightarrow \pm\infty$. При этом $g'(\xi)$ меняет знак не более одного раза при изменении ξ от $-\infty$ до $+\infty$. Наиболее полные результаты получены для диссипативных нелинейных уравнений и для возмущений уравнений, интегрируемых методом обратной задачи рассеяния; для не интегрируемых методом обратной задачи рассеяния волновых уравнений построены сингулярные асимптотические решения нелинейных уравнений Клейна – Гордона.

Для доказательства отсутствия бегущей волны, сглаживающейся на бесконечности, достаточно получить отрицание хотя бы одного из фактов, перечисленных в определении. Чтобы доказать существование, надо обосновать сходимость интегралов от производной на бесконечности.

В отличие от *солитона* бегущая волна, сглаживающаяся на бесконечности, не обладает структурной устойчивостью (от обыкновенной бегущей волны ее отличает условие на производную).

Используемая здесь классификация решений приводится на рисунке.

Займемся доказательством существования решения уравнения

$$\varphi''_t(x,t) = a^2 \cdot \varphi''_{xx}(x,t) + b(x,t)\varphi_t(x,t) + f(\varphi(x,t)), \quad (4)$$

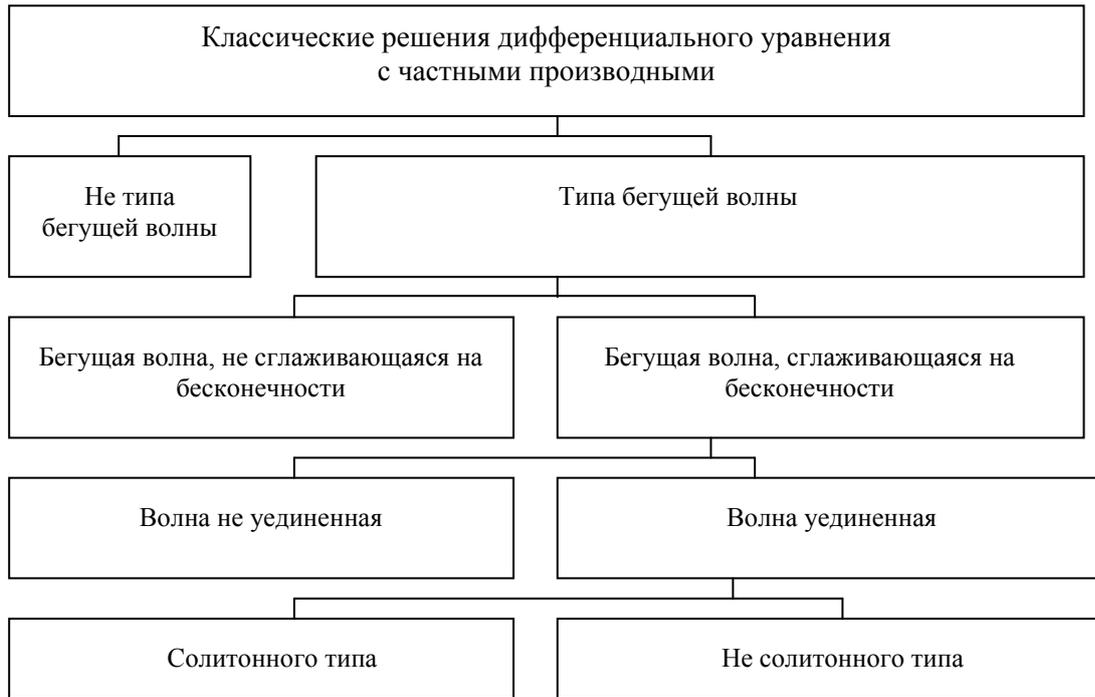
где $a = \text{const}$, $a \neq 0$, $|b(x,t)| < B$, $|b_x(x,t)| < B_1$, $|b_t(x,t)| < B_2$, $c = \text{const}$ при условиях

$$\varphi(x,t)|_{t=0} = \Psi_0(x), \quad \varphi_t(x,t)|_{t=0} = \Psi_1(x), \quad -\infty < x < +\infty. \quad (5)$$

Предполагается, что функция f задана и дифференцируема на всей числовой оси и ее производная ограничена:

$$|f'(\varphi)| < M \quad (6)$$

($f(z)$ либо ограничена на всей оси, либо растет на бесконечности не быстрее линейной).



Классификация решений

Введем новые переменные: $u = at - x + u_0$, $v = at + x$, где u_0 – некоторая постоянная; примем $z(u, v) = \varphi\left(\frac{v - (u - u_0)}{2}, \frac{v + (u - u_0)}{2a}\right)$.

Задача Коши (4), (5) примет вид

$$z_{uv}(u, v) = \varepsilon_1(u, v)z_u(u, v) + \varepsilon_2(u, v)z_v(u, v) + F(z(u, v)), \quad (7)$$

$$z(u, v)|_{u+v=u_0} = z_0(u), (z_v(u, v) + z_u(u, v))|_{u+v=u_0} = z_1(u). \quad (8)$$

Проинтегрировав (7) по треугольнику Δ' с вершинами в точках $(u; u - u_0)$, $(u; v)$, $(u_0 - v; v)$, получим:

$$\int_{\Delta'} z_{uv}(\xi, \eta) d\xi d\eta = z(u, v) - z_0(u_0 - v) - \int_{u_0 - v}^u z_u(\xi, u_0 - \xi) d\xi.$$

С другой стороны,

$$\int_{\Delta'} z_{uv}(\xi, \eta) d\xi d\eta = z(u, v) - z_0(u) - \int_{u_0 - u}^v z_v(u_0 - \eta, \eta) d\eta.$$

Таким образом, имеем

$$2 \int_{\Delta'} z_{uv}(\xi, \eta) d\xi d\eta = 2z(u, v) - z_0(u_0 - v) - z_0(u) - \int_{u_0 - v}^u z_u(\xi, u_0 - \xi) d\xi - \int_{u_0 - u}^v z_v(u_0 - \eta, \eta) d\eta. \quad (9)$$

Введя $\mu = u_0 - \eta$, получим:

$$z(u, v) = \frac{1}{2} \left(z_0(u_0 - v) + z_0(u) + \int_{u_0 - v}^u z_1(\xi) d\xi \right) + \iint_{\Delta'} (\varepsilon_1(\xi, \eta) z_u(\xi, \eta) + \varepsilon_2 z_v(\xi, \eta) + F(z(\xi, \eta))) d\xi d\eta. \quad (10)$$

Используя (10), построим последовательные приближения:

$$z_{(n+1)}(u, v) = \frac{1}{2} \left(z_0(u_0 - v) + z_0(u) + \int_{u_0 - v}^u z_1(\xi) d\xi \right) + \iint_{\Delta'} (\varepsilon_1(\xi, \eta) (z_{(n)})_u(\xi, \eta) + \varepsilon_2 (z_{(n)})_v(\xi, \eta) + F(z_{(n)}(\xi, \eta))) d\xi d\eta. \quad (11)$$

Справедливы утверждения:

1. Приближения (11) сходятся к решению интегральной задачи (10), если высота \hat{h} треугольника удовлетворяет оценке:

$$\hat{h} < \frac{a\sqrt{2}}{M} \left(\sqrt{4(B + a(b_1 + b_2))^2 + 2M} - 2(B + a(b_1 + b_2)) \right).$$

2. Приближения (11) сходятся к решению задачи Коши (7), (8).

Вернемся к исходной задаче. Она имеет решение

$$\varphi(x, t) = z(at - x + u_0, at + x)$$

в полосе

$$0 < \frac{1}{a\sqrt{2}} \hat{h} < H = \frac{1}{M} \left(\sqrt{4(B + a(b_1 + b_2))^2 + 2M} - 2(B + a(b_1 + b_2)) \right).$$

Это эквивалентно утверждению: существует H такое, что для любого $0 < h < H$ задача Коши (4), (5) имеет решение в полосе

$$0 \leq t \leq h < H = \frac{1}{\left(\sqrt{(B + a(b_1 + b_2))^2 + M/2} + (B + a(b_1 + b_2)) \right)}.$$

Рассмотрим уравнение (4); примем $a = \text{const}$, $a \neq 0$, $|b(x, t)| < B$, $|b_x(x, t)| < B_1$, $|b_t(x, t)| < B_2$, $c = \text{const}$, f задана и дифференцируема на всей числовой оси, и ее производная ограничена $|f'(\varphi)| < M$.

Снова поставим для него задачу Коши (5). Рассмотрим также уравнение

$$\varphi_{tt}(x, t) = a^2 \cdot \varphi_{xx}(x, t) + f(\varphi(x, t)). \quad (12)$$

Поставим для него ту же задачу Коши (5).

Введем обозначения:

$$m = \max \left| \frac{1}{4a} b(x, y) \right|,$$

$$n_1 = \max \left| \frac{1}{8a^2} (b_y(x, y) - ab_x(x, y)) \right|,$$

$$n_2 = \max \left| \frac{1}{8a^2} (b_y(x, y) + ab_x(x, y)) \right|,$$

$$M = \max \left| \frac{1}{4a^2} f' \right|,$$

$\varphi^*(x, t)$ – решение задачи Коши (4), (5),

$\varphi(x, t)$ – решение задачи Коши (12), (5).

Т е о р е м а . Если $\varphi \neq 0$, то при приведенных выше условиях для любых x, t из полосы $0 \leq t \leq h < H$ справедливо:

$$\frac{\max_{\Delta} |\varphi - \varphi^*|}{\max_{\Delta} |\varphi|} \leq \frac{8maH + 2(n_1 + n_2)a^2H^2}{1 - 2Ma^2H^2}, \quad (13)$$

где Δ – треугольник с вершинами в точках $(x - at; 0)$, $(x; t)$, $(x + at; 0)$.

Таким образом, сделав обратную замену переменных, легко получим заявленную оценку.

В ы в о д ы

1. Доказано существование решения задачи Коши в полосе возмущённого уравнения Клейна – Гордона.

2. Получена оценка относительной погрешности решения задачи Коши в полосе при замене возмущённого уравнения Клейна – Гордона невозмущённым, а именно:

- чем ближе точка (u, v) к прямой, на которой заданы начальные условия, т.е. чем меньше h , тем ближе решения;

- чем меньше величины $\max |\varepsilon_1|$, $\max |\varepsilon_2|$, $\max |\varepsilon_{1u}|$, $\max |\varepsilon_{2v}|$, тем ближе решения.

3. Результаты исследований позволяют находить границы, при которых допустима замена малых по модулю постоянных ε_j нулем.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Прохоров Сергей Григорьевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

E-mail: kozhunov@yandex.ru

Кожунов Антон Алексеевич,

аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция»

E-mail: kozhunov@yandex.ru

Родионов Юрий Владимирович,

доктор технических наук, профессор

E-mail: dekauto@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Prohorov Sergey Grigorievich,

Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply
and ventilation»

E-mail: kozhunov@yandex.ru

Kozhunov Anton Alekseevich,

Postgraduate of the department «Heat, gas
supply and ventilation»

E-mail: kozhunov@yandex.ru

Rodionov Juri Vladimirovich,

Doctor of Sciences, Professor

E-mail: dekauto@pguas.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПУТЕМ ПОДОГРЕВА ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА

С.Г. Прохоров, А.А. Кожунов, Ю.В. Родионов

Представлены результаты анализа состояния вопроса подогрева дутьевого воздуха в котлах малой мощности. Обоснована эффективность установки воздухоподогревателей. Предложены регенеративно-горелочный блок для котлов малой мощности и компоновочные схемы котлов малой мощности с регенеративными воздухоподогревателями.

Ключевые слова: котлы малой мощности, энергоэффективность, подогрев дутьевого воздуха.

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF LOW POWER BOILERS BY HEATING THE BLAST AIR

S.G. Prohorov, A.A. Kozhunov, J.V. Rodionov

The analysis results of heating blast air in the boilers of small capacity are given. The efficiency of air heaters installation is proved. Regenerative-combustion unit for boilers of small capacity and circuits boilers layout with regenerative air heater are proposed.

Keywords: boilers of low power, energy efficiency, heating blast air.

Повышение энергетической эффективности производства – одна из приоритетных задач экономики России. По оценкам экспертов, до одной трети потенциала энергосбережения приходится на коммунальный сектор страны, использующий большое количество котлов малой мощности. Основным ресурсом повышения энергетической эффективности таких котлов является теплота дымовых газов (несет в себе до 20 % резервов экономии топлива). Одним из вариантов использования теплоты дымовых газов является возвращение части ее в котлоагрегат при помощи рекуператоров, регенераторов и других утилизационных устройств. Использование утилизационного оборудования за крупными энергетическими котлами и технологическими печами является устоявшейся практикой. В котлах малой мощности утилизация теплоты пока не нашла широкого применения. Однако разработка новых методов и средств для подогрева дутьевого воздуха способна повысить энергетические показатели работы котлов этой группы.

Воздухоподогреватели – рациональное теплоиспользующее оборудование, за счет которого теплота продуктов сгорания непосредственно, без какой-либо трансформации, возвращается с подогретым воздухом в рабочее пространство огнетехнического агрегата. При установке воздухоподогревателя и постоянстве расхода топлива вся введенная в котел физическая теплота воздуха расходуется на повышение производительности, а следовательно, и КПД котла.

Благодаря воздухоподогревателю использование тепла, выделяемого сжигаемым топливом, повышается на 10-15 %, также подогретый воздух улучшает горение топлива, в результате чего снижается химический недожог [1]. Исследования горелок показали, что при подогреве воздуха в результате ускорения реакции горения длина факела пламени значительно уменьшается.

Предварительный подогрев воздуха, подаваемого на горение, способствует снижению потерь тепла, связанных с дымовыми газами (q_2). В среднем, снижение температуры дымовых газов на каждые 20 °С приводит к повышению КПД на 1 % [2].

По способу передачи теплоты от греющей среды к нагреваемой воздухоподогреватели можно разделить на рекуперативные (передача теплоты от дымовых газов к нагреваемому воздуху происходит через разделяющую стенку) и регенеративные (теплота передается посредством промежуточного теплоносителя). В отдельный класс можно выделить рекуперативные и регенеративные горелки, в которых горелочное устройство совмещено с рекуператором или регенератором, нагревающим воздух. Также известны контактные воздухоподогреватели, в которых дымовые газы нагревают воздух при непосредственном контакте с ним.

В настоящее время применяются следующие типы рекуперативных воздухоподогревателей: трубчатые, петлевые, игольчатые, струйные, ребристые, циклонные, пластинчатые, пластинчато-ребристые, сетчатые, ребристые с псевдооживлением, вентиляторные (с проволочным оребрением), спирально-ребристые, змеевиковые, элементные (щелевые).

Регенеративные воздухоподогреватели характеризуются большой нестационарностью изменения температур во времени в процессе передачи теплоты. Однако по сравнению с рекуперативными воздухоподогревателями они обладают большей компактностью поверхности теплообмена и улучшенными условиями очистки от загрязнений [3].

Рекуперативные горелки представляют собой газогорелочные устройства со встроенными в них рекуператорами. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства печи через рекуперативную горелку, обеспечивая подогрев дутьевого воздуха.

Регенеративные горелки работают по принципу краткосрочной аккумуляции энергии дымовых газов в регенераторах тепла.

Целесообразность установки воздухоподогревателя определяется из рассчитанной величины тепловой мощности теплоутилизационного устройства или по значению потерь тепла с дымовыми газами при подогреве дутьевого воздуха и без него.

Потери тепла с дымовыми газами при подогреве дутьевого воздуха и без него оцениваются по Зигерту [2]:

$$W_L = \frac{H_g}{H_f} = c \cdot \frac{T_{gas} - T_{air}}{CO_2}, \quad (1)$$

где W_L – потери тепла с дымовыми газами, %; c – коэффициент Зигерта (зависит от температуры дымовых газов, концентрации CO_2 и вида топлива, значения приводятся в справочной литературе); T_{gas} – измеренная температура дымовых газов, °С; T_{air} – измеренная температура поступающего воздуха, °С; CO_2 – измеренная концентрация CO_2 в дымовых газах, % об.

Потери тепла с уходящими газами снижаются с увеличением температуры воздуха, подаваемого на горение.

Потери тепла (%) с дымовыми газами также получают по Равичу [4]:

$$q_2 = 0,01z(t_{yx} - t_b), \quad (2)$$

где z – поправочный коэффициент (табличное значение); t_{yx} – температура уходящих газов, °C; t_b – температура воздуха, поступающего на горение, °C.

На сегодняшний день определение тепловой мощности теплоутилизатора проводится по [5] и [6]. При расчетах по методу [5] необходимо располагать данными об элементарном составе природного газа, что осложняет его применение в практических расчетах. Методика [6] относительно просто позволяет определять тепловую мощность теплоутилизатора при минимуме известных данных, используя для этой цели расчеты по приведенным характеристикам топлива [7].

В практических расчетах целесообразно пользоваться величиной теоретической относительной утилизируемой тепловой мощности, которая определяется в процентах от тепловой мощности топки котла:

$$q_{яв}^{то} = A\Delta t, \quad (3)$$

$$A = \left(0,24 + 0,45 \frac{0,13 + 0,01\alpha_{yx}}{\alpha_{yx} - 0,058} \right) [1,33 + 1,415(\alpha_{yx} - 1)] \cdot 10^{-1}. \quad (4)$$

В [6] представлена таблица рассчитанных значений A при различных α_{yx} .

Для различных величин Δt получены следующие значения теоретической относительной тепловой мощности теплоутилизатора: при $\Delta t = 130^\circ\text{C}$ $q_{яв}^{то} = 7,5\%$; при $\Delta t = 80^\circ\text{C}$ $q_{яв}^{то} = 4\%$; при $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ $q_{яв}^{то} = 2\%$.

Также представляет интерес определение теоретического удельного количества тепла, которое может быть получено в теплоутилизаторе при сжигании в топке котла 1 м^3 природного газа, имеющего низшую теплоту сгорания Q_H^c :

$$q_{яв}^{туд} = q_{яв}^{то} Q_H^c \cdot 10^{-2}. \quad (5)$$

При установке теплоутилизатора за котлом, в котором сжигается природный газ с низшей теплотой сгорания $Q_H^c = 35600 \text{ кДж/м}^3$ для ранее рассчитанных значений $q_{яв}^{то}$ получим: при $q_{яв}^{то} = 7,5\%$ $q_{яв}^{туд} = 2670 \text{ кДж/м}^3$; при $q_{яв}^{то} = 4\%$ $q_{яв}^{туд} = 1424 \text{ кДж/м}^3$; при $q_{яв}^{то} = 2\%$ $q_{яв}^{туд} = 712 \text{ кДж/м}^3$.

Зависимости для определения $q_{яв}^{то}$ и $q_{яв}^{туд}$ при сжигании газа с $Q_H^c = 35600 \text{ кДж/м}^3$ приводятся на рис. 1.

Полученные значения тепловой мощности теплоутилизатора, работающего в «сухом» режиме, позволяют перейти к экономическим расчетам обоснования целесообразности установки такого оборудования.

Разработка и применение регенеративных воздухоподогревателей, предназначенных для работы за котлами малой мощности, оправдана в случае высокого уровня мотивации к энергосбережению, технической грамотности обслуживающего персонала и применения средств автоматизации.

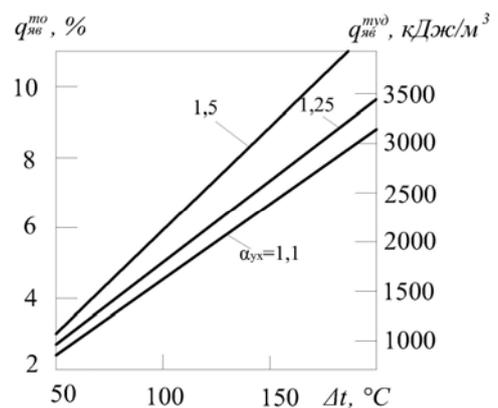


Рис. 1. Зависимости $q_{яв}^{то}$ и $q_{яв}^{туд}$ от Δt и α_{yx}

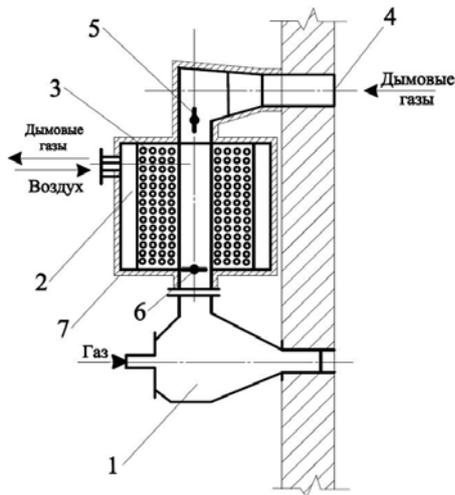


Рис. 2. Регенеративно-горелочный блок:
1 – горелка; 2 – регенератор;
3 – насадка; 4 – канал дымовых газов;
5, 6 – перекидные клапаны;
7 – изоляция

Разработана конструктивная схема стационарного переключающегося воздухоподогревателя в составе регенеративно-горелочного блока (рис. 2).

Предложенный регенеративно-горелочный блок работает следующим образом. При газовом периоде дымовые газы поступают в насадку регенератора (стальные шарики и т.п.) и нагревают ее. При воздушном периоде воздух, подаваемый вентилятором в регенератор, проходит через кольцевой слой нагретых шариков и поступает в горелку. Направления движения дымовых газов и воздуха определяются соответствующим положением перекидных клапанов. На данное устройство подана заявка на полезную модель.

В котлоагрегатах малой мощности воздухоподогреватели не входят в комплект поставки завода-изготовителя. При проектировании или модернизации котельной приходится выполнять поверочный, а иногда и конструктивный расчет такого оборудования, а также выбирать

приемлемые компоновочные решения для его размещения.

По компоновке с котлом различают индивидуальные и центральные (групповые) воздухоподогреватели. В случае установки с котлами малой мощности переключающихся регенеративных воздухоподогревателей целесообразна установка воздухоподогревателей, состоящих минимум из двух блоков. В течение одного периода дымовые газы проходят через первый блок, нагревая насадку, а подогреваемый воздух проходит через второй блок, воспринимая теплоту нагретой насадки. И так далее.

Схема установки переключающихся регенераторов за котлом малой мощности с одной горелкой представлена на рис. 3. Дымовые газы поступают в один из регенераторов, где отдают свою теплоту насадке. В это время воздух от воздухозабора котла поступает во второй регенератор, где воспринимает теплоту нагретой насадки и подается на горение. Затем происходит переключение и дымовые газы начинают поступать во второй регенератор, а воздух – в первый. В случае отключения регенераторов (ремонт, авария и т.д.) дымовые газы удаляются от котла через обводной газоход.

На рис. 4 представлена схема установки переключающихся регенераторов за котлом малой мощности с двумя горелками. При такой компоновочной схеме горелки работают попеременно. Переключение происходит с помощью перекидных клапанов, которые управляются средствами автоматики.

На рис. 5 представлена принципиальная схема установки центрального регенератора. По этой схеме дымовые газы котлов собираются в коллективный газоход, по которому поступают в первый блок переключающегося (а) или вращающегося (б) регенератора, нагревая насадку. Воздух от воздухозабора котельной поступает во второй блок регенератора (а), где нагревается и поступает на горение.

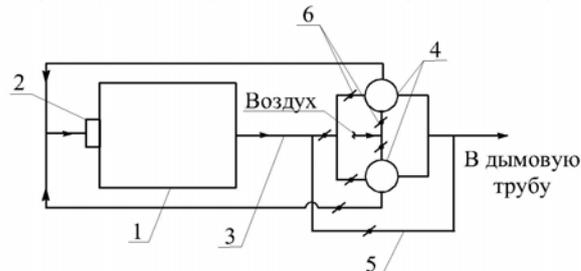


Рис. 3. Принципиальная схема установки переключающихся регенераторов за котлом малой мощности с одной горелкой:

1 – котел; 2 – горелка; 3 – газоход; 4 – регенераторы; 5 – обводной газоход; 6 – клапаны

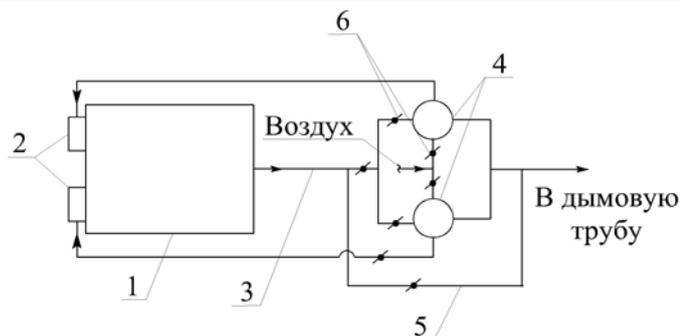


Рис.4. Принципиальная схема установки переключающихся регенераторов за котлом малой мощности с двумя горелками:

1 – котел; 2 – горелки; 3 – газоход; 4 – регенераторы; 5 – обводной газоход; 6 – клапаны

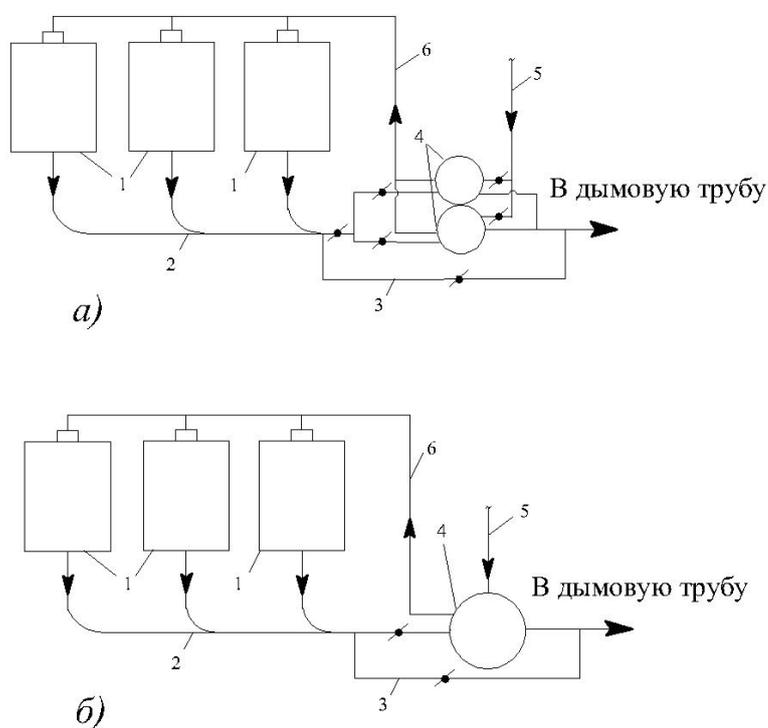


Рис. 5. Принципиальная схема установки центрального регенератора:

1 – котлы; 2 – газоход; 3 – обводной газоход; 4 – регенератор (а – переключающийся из двух блоков; б – вращающийся); 5 – воздуховод холодного воздуха; 6 – воздуховод подогретого воздуха

Заклучение

Подогрев дутьевого воздуха позволяет эффективно решать проблему повышения КПД котла. Воздухоподогреватели регенеративного типа наиболее компактны и эффективны. Использование воздухоподогревателей «сухого» типа в котлах малой мощности способно снизить потери теплоты с уходящими газами на величину до 5 %.

Разработанный регенеративно-горелочный блок интересен в техническом контексте проблемы энергосбережения, однако требуется его экспериментальная апробация.

Компоновочные схемы котлов малой мощности с переключающимися и вращающимися воздухоподогревателями показывают размещение такого оборудования в помещении котельной.

1. Добряков Т.С. Воздухоподогреватели котельных установок / Т.С. Добряков, В.К. Мигай, В.С.Назаренко [и др.]. – Л.: Энергия,1977. – 184 с.
2. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency – Seville (Spain), 2009. – 398 p.
3. Кирсанов, Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях / Ю.А. Кирсанов. – М.: Физматлит, 2007. – 240 с.
4. Равич, М.Б. Эффективность использования топлива / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – Л.: Энергия, 1977. – 296 с.
6. Семенюк, Л.Г. Методика определения тепловой мощности теплоутилизаторов / Л.Г. Семенюк // Промышленная энергетика. – 1992. – №4. – С. 28–31.
7. Пеккер, Я.Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива / Я.Л. Пеккер. – М.: Энергия, 1977. – 255 с.

References

1. Dobryakov T.S. Air heaters boilers / T.S. Dobryakov, V.K. Migay, V.S.Nazarenko [etc.]. – L.: Energy, 1977. – 184 p.
2. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. – Seville (Spain), 2009. – 398 p.
3. Kirsanov, Y.A. Cyclic thermal processes and the theory of heat conduction in the regenerative air heaters / Y.A. Kirsanov. – M.: Physical Mathematical Literature, 2007. – 240 p.
4. Ravitch, M.B. Fuel efficiency / M.B. Ravitch. – M.: Science, 1977. – 344 p.
5. Thermal design of boilers (standard method). – L.: Energy, 1973. – 296 p.
6. Semeniuk, L.G. Method of determining the heat exchanger capacity / L.G. Semeniuk // Industrial Energy. – 1992. – № 4. – P. 28–31.
7. Pekker, Y.L. Thermal engineering calculations given fuel properties / Y.L. Pekker. – M.: Energy, 1977. – 255 p.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук, профессор
кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Ежов Евгений Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»

Салмин Владимир Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Эксплуатация
транспортных средств»
E-mail: salmin-penza@yandex.ru

Ивашенко Никита Юрьевич,
студент
E-mail: tgv@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Econom Sciences,
Professor of the department «Heating, gas
supply and ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Ezhov Evgeniy Grigorievich,
Doctor of Physico-Mathematical Science,
Associate Professor of the department
«Information and computer systems»

Salmin Vladimir Vasilievich,
Doctor of Science, Professor,
Head of the department «Transport
operations»
E-mail: salmin-penza@yandex.ru

Ivashchenko Nikita Yurievich,
student
E-mail: tgv@pguas.ru

ОПЫТ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА

Т.И. Королева, В.В. Салмин, Е.Г. Ежов, Н.Ю. Ивашенко

Рассмотрены вопросы энергосбережения, достигаемого путем регулирования теплотребления в зданиях с помощью автоматизации индивидуальных тепловых пунктов.

Ключевые слова: индивидуальный тепловой пункт, теплотребление, экономия тепловой энергии.

BUILDING HEAT CONTROL BY UPGRADING INDIVIDUAL HEATER

T.I. Korolev, V.V. Salmin, E.G. Ezhov, N.Y. Ivashchenko

The problems of energy efficiency by controlling heat in buildings with automation of individual heating units are considered.

Keywords: individual heating unit, heat consumption, heat savings.

Пензенская область – энергодефицитный регион: около 99 % топливных ресурсов и около 80 % электроэнергии поставляется из других территорий.

В настоящее время в регионе существует противоречие между высокой энерго- и материалоемкостью созданного производственного потенциала и быстрым ростом затрат в отраслях энергетического комплекса. Выход местной энергетики и промышленности из кризисного состояния возможен лишь при условии жесткого режима экономии энергии.

Из-за роста энергопотребления увеличивается потребность в энергоносителях: природном газе, каменном угле, мазуте и др.

В настоящее время существенно уменьшился объем средств и материальных ресурсов, выделяемых на ремонт и реконструкцию оборудования тепловых источников, тепловых сетей и теплотребляющих установок [1].

Модернизацию тепловых пунктов осуществляют для совершенствования теплоснабжения здания в соответствии с современными требованиями.

Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) – это комплекс технических устройств теплоснабжения здания (отопление, вентиляция, горячее водоснабжение). Он предназначен для передачи и распределения тепловой энергии по объектам жилищно-коммунального хозяйства. Для работы ИТП необходимо лишь подключение теплоносителя и водопроводной воды, а также подвод электроэнергии для работы циркуляционных насосов [2].

Устаревшие ИТП оснащены элеваторными узлами смешения воды, имеют ограниченные возможности регулирования параметров теплоносителя и, следовательно, экономии потребляемой тепловой энергии.

Основными задачами модернизации индивидуальных тепловых пунктов являются организация учета теплоснабжения абонентом и сокращение потерь тепловой энергии при улучшении уровня теплового комфорта в обслуживаемых помещениях. Для этого, как минимум, на абонентском вводе устанавливают прибор учета и систему автоматического регулирования потребления тепловой энергии.

Модернизация абонентских вводов позволяет:

- оптимизировать распределение тепловой нагрузки из теплосети;
- адекватно управлять гидравлическим и тепловым режимами внутренней системы теплоснабжения здания;
- снизить потери в тепловых сетях;
- экономить энергоресурсы;
- уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Автоматизация ИТП является одним из наиболее эффективных инструментов для снижения затрат на оплату тепловой энергии.

Автоматизированные ИТП в сочетании с индивидуальным автоматическим регулированием теплоотдачи отопительных приборов позволяют полностью осуществить в зданиях мероприятия по экономии тепла, воды, электроэнергии на перекачку, а также получить снижение затрат на прокладку трубопроводов систем теплоснабжения. Наличие малошумных циркуляционных насосов, компактных теплообменников и приборов авторегулирования подачи и учета тепла позволяют успешно решать эту задачу [3].

Преимущества автоматизированного индивидуального теплового пункта:

- экономия до 15 % тепла на отопление за счет автоматизации регулирования отпуска тепла конкретному абоненту (зданию);
- значительное сокращение потребности в квалифицированном обслуживающем персонале, так как автоматизированные тепловые пункты работают «на замке»;
- автоматическое поддержание комфортных условий проживания за счет контроля параметров теплоносителей: температуры и давления сетевой воды, воды системы отопления и водопроводной воды; температуры воздуха в отапливаемых помещениях (в контрольных точках) и наружного воздуха;
- снижение размера оплаты потребленного зданием тепла, которое осуществляется по фактически измеренному расходу за счет использования приборов учета;
- обеспечение экономии тепла, снижение затрат на монтажные работы за счет полного заводского исполнения. Срок окупаемости – менее двух лет. Экономия тепловой энергии составляет около 30 %;
- регулирование температуры теплоносителя, подаваемого в систему отопления, в зависимости от температуры наружного воздуха;
- регулирование температуры теплоносителя, возвращаемого в теплотрассу, в соответствии с температурой наружного воздуха по заданному температурному графику, что важно в переходный период, при большой разнице температур ночью и днем, что позволяет избежать претензий и штрафных санкций теплоснабжающей организации;
- регулирование тепловой нагрузки в системе горячего водоснабжения.

Узел ввода начинается с головных задвижек на прямом и обратном сетевых трубопроводах. Как правило, перед головными задвижками проходит «граница проектирования» тепловых пунктов. Головные задвижки могут быть с ручным приводом и с

электроприводом, в зависимости от диаметра их условного прохода. Если установлены головные задвижки с электроприводом, они должны открываться и закрываться оператором [2].

Далее, за головными задвижками, размещается узел учета расхода тепловой энергии и теплоносителя. Узел учета разрабатывается по соответствующим правилам. В обязательном порядке на узле учета должны быть установлены два расходомера – на прямом и обратном сетевых трубопроводах.

Узлы учета тепловой энергии, по требованиям нормативных документов, должны быть установлены в любом тепловом пункте – либо для коммерческого учета расхода тепловой энергии и теплоносителя, либо для технологического учета, позволяющего контролировать рациональное использование тепловой энергии и теплоносителя.

Грязевики и фильтры (желательно, сетчатый инерционный с магнитным вкладышем) необходимы для качественной фильтрации теплоносителя. Манометры, устанавливаемые как на прямом, так и на обратном трубопроводах, предназначены для контроля давления в сети.

За узлом учета на подающем трубопроводе в обязательном порядке следует устанавливать регулятор разности давлений для поддержания постоянной разности давлений между подающим и обратным трубопроводами тепловой сети.

Узлы смешивания прямого и обратного теплоносителя должны проектироваться на основе сравнения расходов теплоносителей. На трубопроводе, по которому проходит меньше теплоносителя, должен устанавливаться регулирующий клапан, подобранный по расчетному расходу, а на другом, присоединяемом трубопроводе, должен размещаться балансировочный клапан, настроенный на расчетный пропуск подмешиваемого теплоносителя.

Например, температура прямого теплоносителя +130 °С, обратного +70 °С, а смесь должна иметь температуру +95 °С, следовательно, потребуется примерно 27 % прямого теплоносителя и 63 % – обратного. Поэтому регулирующий клапан должен быть установлен на прямом трубопроводе, а на перемычке – балансировочный клапан [4].

Исходя из этого элеваторный узел можно заменить смесительным насосом с установкой регулирующего клапана.

Допустима установка трехходового клапана, если есть возможность обеспечить постоянное давление в точке смешивания двух сред внутри клапана.

Замена элеватора на насос позволяет реализовать множество энергосберегающих функций автоматического регулирования теплоснабжения здания как в момент модернизации теплового пункта, так и при последующей модернизации системы отопления и горячего водоснабжения. Насос и регулирующий клапан нельзя устанавливать последовательно, один за другим. Насосы должны всегда работать в одной расчетной и отлаженной точке расходной характеристики. Попытка объяснить такое расположение насоса и регулирующего клапана тем, что применяется насос с частотным преобразователем (что повышает стоимость насоса), неубедительна.

Тепловой пункт, кроме того, должен быть оборудован приборами учета расхода и температуры теплоносителя как на подающем (прямом), так и на обратном трубопроводе. Смысл контроля обратного сетевого теплоносителя заключается в том, что не исключены случаи (особенно в переходные периоды с зимы на весну и с осени на зиму), когда обратный сетевой теплоноситель в тепловом пункте может иметь завышенную температуру по сравнению с требуемой по температурному графику. Разность температур наружного воздуха в ночные и дневные часы может быть достаточно значительной, поэтому ночью необходимо подавать из сети в тепловые пункты теплоноситель с более высокой температурой. Известно, что емкость тепловой сети велика, и хотя источнику теплоснабжения уже поступила команда понизить температуру сетевого теплоносителя из-за повышения температуры наружного воздуха, порция теплоносителя с завышенной для этого момента температурой еще находится в тепловой сети [5].



Рис.1. Существующий тепловой пункт

В ходе обследования было установлено:

- Износ оборудования данного теплового пункта составляет 50–80 %.
- Наблюдается «недотоп» и «перетоп» помещений из-за отсутствия автоматического регулирования в зависимости от колебаний температуры наружного воздуха в течение отопительного периода.

Состояние оборудования теплового пункта:

- Высокий износ грязевиков, что приводит к коррозии трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры.

- На задвижках видны потеки и ржавчина. Из-за это появляются высокие местные сопротивления.
- Разрушена изоляция на трубчатых теплообменниках, что является причиной дополнительных теплопотерь.
- Громоздкость теплового пункта.

Ввиду высокой аварийности система отопления может в любое время выйти из строя, а ремонт окажется продолжительным, что недопустимо в отопительный период.

С целью модернизации и реконструкции существующего теплового пункта можно предложить новую схему с зависимой системой отопления со смесительным трехходовым клапаном и циркуляционным насосом. Модернизированная схема индивидуального теплового пункта представлена на рис. 2 [5].

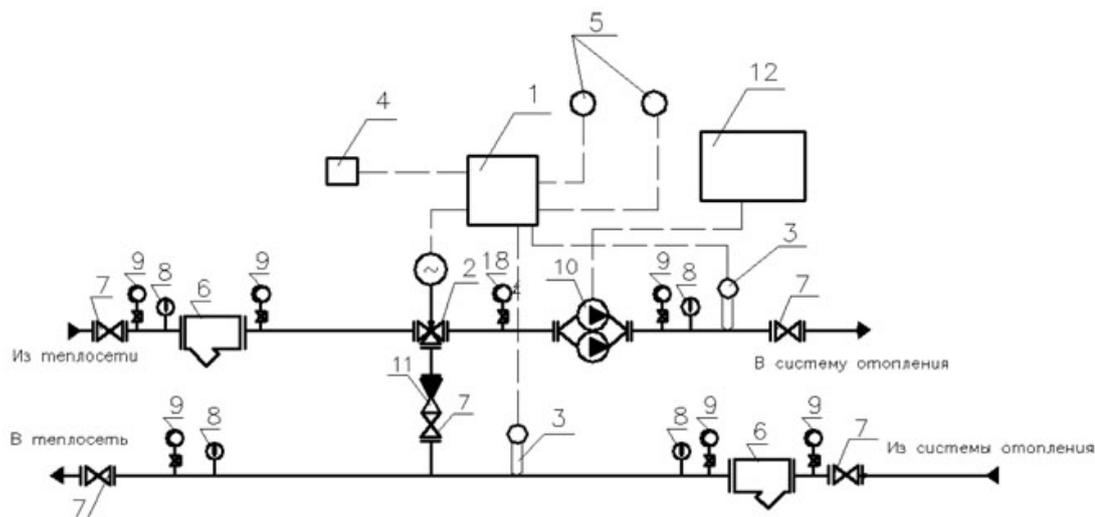


Рис. 2. Схема модернизированного теплового пункта

В таблице приведен перечень и стоимость оборудования нового теплопункта.

Примерная ведомость оборудования для реконструируемого теплового пункта

Поз.	Наименование	Количество	Цена ед. руб. с НДС
1	Регулятор температуры РТ-2010	1	8900
2	Клапан смесительный трехходовой с сервоприводом и погодным регулированием	1	16000
3	Датчик температуры теплоносителя	2	2950
4	Датчик температуры наружного воздуха	1	2950
5	Датчик температуры воздуха внутри помещения	2	2950
6	Фильтр сетчатый магнитный	2	16500
7	Заслонка поворотная	5	5000
8	Термометр Т-100-Т 0-1600С L=100 мм с гильзой	4	530
9	Манометр 16 бар	6	480
10	Насос циркуляционный сдвоенный	1	По расчету
11	Клапан обратный	1	3685
12	Шкаф ПЗА и управления нагрузками с резервированием для двух трёхфазных нагрузок 10-15 кВт	1	26750
18	Манометр ЭКМ	1	
	Итого с НДС без насоса		127185

Цена ориентировочная и указана по расчету с использованием укрупненных показателей (цены по прайсу). Датчики температуры выводятся на регулятор температуры РТ-2010 (до 18 каналов регулирования).

Альтернативный вариант: замена трехходового смесительного клапана и циркуляционного насоса насосом с частотным приводом.

С помощью датчиков температуры и системы автоматики с погодным регулированием возможно поддержание параметров теплоносителя по температурному графику. Цена насоса превышает цену обычного циркуляционного насоса в 2,5–3 раза. Но частотный привод позволяет увеличить экономический эффект работы ИТП на 15–20 %.

Выводы

Рекомендуется реконструкция теплового пункта здания в связи с большим физическим и моральным износом. Это позволит:

- Иметь более качественное регулирование параметров теплоносителя.
- При наличии средств автоматизации и благодаря рациональному использованию энергетических ресурсов, получить их экономию более 30 %.
- Повысить гидравлическую устойчивость системы отопления.
- При наличии диспетчерского контроля на базе систем GSM, GPRS, своевременно устранять аварийные ситуации.

Кроме того, стоит учесть удобство монтажа современных индивидуальных тепловых пунктов, что позволяет снизить капитальные затраты. Высокие капитальные затраты компенсируются короткими сроками окупаемости (около двух лет) и сокращением штата обслуживающего персонала.

Список литературы

1. Королева, Т.И. Энергосберегающие мероприятия в системах отопления общественных зданий / Т.И. Королева, А.А. Кузьмишкин, М.Е. Васин, А.П. Левцев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С.154–159.
2. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справочное пособие / под ред. Л.Д. Богуславского. – М.: Стройиздат, 1990.
3. Королева, Т.И. Оценка эффективности использования энергосберегающих мероприятий при переходе на автономный источник теплоты / Т.И. Королева, В.В. Салмин, Е.Г. Ежов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С.154–160.
4. Королева, Т.И. Тепловой режим зданий / Т.И. Королева, А.И.Еремкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 367с.
5. СП 411095 Проектирование тепловых пунктов. – М.: Минстрой России, 1996. – 165 с.

References

1. Koroleva, T.I. Energy-saving measures in heating of public buildings / T.I. Koroleva, A.A. Kuzmishkin, M.E. Vasin, A.P. Levtsov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 2. – P.154–159.
2. Energy savings in heating, ventilation and air-conditioning: reference guide / ed. L.D. Boguslawski. – M.: Stroyizdat, 1990.
3. Koroleva, T.I. Evaluating the effectiveness of the use of energy-saving measures in the transition to an independent source of heat / T.I. Koroleva, V.V. Salmin, E.G. Yezhov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P.154–160.
4. Koroleva, T.I. Thermal regime of buildings / T.I. Koroleva, A.I.Eremkin. – Rostov-on-Don: Phoenix, 2008. – 367 p.
5. SP 411 095 Thermal design points. – M.: Russian Ministry of Construction, 1996. – 165 p.

УДК 541.18:628.34

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

Вилкова Наталья Георгиевна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
Тел.: 8(8412)546851
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Еланева Светлана Ивановна,
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

Шумкина Анна Александровна,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

Дорчина Ольга Васильевна,
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

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

Vilkova Natalya Georgievna,
Doctor of Chemistry Science, Professor of the
department «Physics and chemistry»
Tel.: 8(8412)54 68 51
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Elaneva Svetlana Ivanovna,
Postgraduate of the department
«Physics and chemistry»
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

Shumkina Anna Aleksandrovna,
Assistant of Professor of the department
«Physics and chemistry»
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

Dorchina Olga Vasilyevna,
Postgraduate of the department
«Physics and chemistry»
E-mail postmaster @ pgasa.penza.com.ru

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева, А.А. Шумкина, О.В. Дорчина

Представлены разработанные оптимальные составы исходных суспензий для получения устойчивых пен, стабилизированных твердыми частицами. Обосновано применение структурированных дисперсных систем для очистки поверхности воды от углеводородной пленки.

Ключевые слова: сточные воды, пены, очистка поверхности воды от углеводородов.

WASTE WATER PURIFICATION: OUTLOOKS OF STRUCTURAL DISPERCED SYSTEMS APPLICATION

N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, A.A. Shumkina, O.V. Dorchina

The suspension compositions developed for the foams stabilized by solid particles are given. Application of structural disperced systems for water surface purification from hydrocarbon films is proved.

Keywords: waste waters, foams, purification of the water surface from the hydrocarbon films.

Известны способы очистки поверхности воды от нефти и нефтепродуктов: распыление сорбентов – хитина или хитозана – на поверхности воды, последующий сбор и утилизация нефтепродуктов с сорбентом; использование карбонатного порошка, активированного смесью нефтеполимерной смолы и битума, а также продуктов пиролиза твердого осадка бытовых сточных вод. Отметим, что приготовление перечисленных сорбентов часто связано со значительными материальными затратами (на нагревание указанных материалов для формирования пористой структуры и, соответственно, высокой удельной поверхности, на использование больших количеств гидрофобизатора и др.). Весьма перспективным с этой точки зрения является применение пен, стабилизированных твердыми частицами [1-5], для очистки поверхности воды от углеводородов. Исследование устойчивости таких дисперсных систем в зависимости от концентрации твердой фазы, степени гидрофобизации твердых частиц и гелеобразования в дисперсионной среде рассмотрено в работах [3–5].

Целью данного исследования является разработка оптимального состава исходных суспензий для получения пен, стабилизированных твердыми частицами, и определение перспектив их применения для очистки поверхности воды от углеводородной пленки.

Материалы и методы исследования

Для стабилизации пен и получения структурированных дисперсных систем использовали два типа твердых частиц: кремнезём, модифицированный катионным ПАВ, и гидроксид алюминия, модифицированный анионным ПАВ. Получали структурированные дисперсные системы с помощью двух методов [5].

В первом случае применяли коллоидный кремнезём: а) аэросил-380 – порошок с диаметром частиц 12 нм; б) 41 % (в пересчете на SiO₂) золь марки Ludox-NS с диаметром частиц 15 нм. Частицы аэросила агрегированы в исходном (порошкообразном) состоянии, и полидисперсные агрегаты присутствовали во всех дисперсиях кремнезема независимо от краевых углов. Средний размер образующихся агрегированных частиц аэросила был равен 3–30 мкм. Для гидрофобизации поверхности частицы кремнезёма модифицировали короткоцепочечным (С2 – С9) катионным ПАВ (гексилламин, 99 %, Мерск). Гексилламин по каплям добавляли в водную дисперсию SiO₂ до определенной концентрации ПАВ при одновременном встряхивании или перемешивании миксером.

Во втором случае использовали дисперсию гидроксида алюминия, которую получали в результате химической реакции сульфата алюминия с гидроксидом натрия. В качестве гидрофобизатора поверхности частиц гидроксида алюминия применяли масляную кислоту. Полученные пены высушивали при комнатной температуре в течение 2–3 суток.

Определение напряжения сдвига

Напряжение сдвига определяли методом тангенциального смещения пластины [6]. В суспензию помещали рифленую металлическую пластину, закрепленную посредством жесткой металлической проволоки с коромыслом торсионных весов. Оставляли систему в покое в течение 10 мин. С помощью торсионных весов прикладывали определенную нагрузку и фиксировали расстояние, пройденное пластиной в суспензии с помощью катетометра (т.к. суспензии были непрозрачными, то наблюдали смещение проволоки, посредством которой пластина прикреплялась к коромыслу весов). Результаты опыта выражали графически в координатах деформации (D), равной расстоянию, пройденному пластиной, мм; P – нагрузка, Н.

Предельное динамическое напряжение сдвига определяли по формуле

$$\tau_c = P/2S, \text{ Н/м}^2,$$

где S – площадь пластины.

Метод удаления углеводородной пленки

Особенностью предлагаемого авторами метода очистки воды пеной является контроль за эффективностью удаления органического вещества, предусматривающий фотосъемку поверхности водной фазы с помощью веб-камеры и оценку площади углеводородной пленки методом компьютерного совмещения изображения углеводородного пятна с измерительной сеткой (площадь одной ячейки 1 мм²). (Отметим, что во всех известных в литературе способах очистки поверхности воды от углеводородной пленки наблюдение за качеством очистки водной фазы проводят визуально.) Исследование эффективности удаления углеводородной пленки с поверхности воды с помощью стабилизированных пен проводили следующим образом: в чашку Петри наливали 35 мл воды, затем на поверхность воды наносили 0,2 мл толуола. Производили фотосъемку (рис.1) поверхности воды с плёнкой углеводорода с помощью веб-камеры Megapixel 10X Digital Zoom $f=3,85$ мм. После этого на углеводородную плёнку наносили определенную навеску сухой пены, перемешивали в течение 30–40 минут и повторяли фотосъемку.

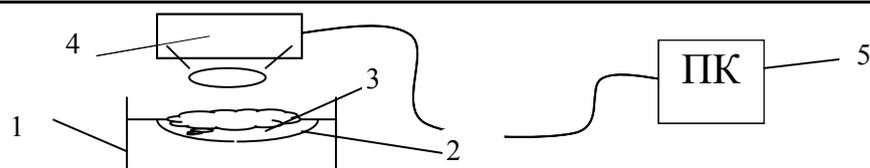


Рис.1. Схема устройства для исследования эффективности удаления углеводородной пленки с поверхности водной фазы:

1 – чашка Петри с водой; 2 – углеводородная плёнка на поверхности воды; 3 – пена; 4 – веб-камера Megapixel 10X Digital Zoom $f=3,85$ мм; 5 – персональный компьютер

Затем углеводородную плёнку с пеной удаляли с помощью перфорированной ложки и повторяли съемку для анализа эффективности удаления углеводородной пленки. Проводили выбор оптимального количества гидрофобизованной пены для полного удаления пленки.

На рис. 2 представлены исходная водная фаза, содержащая углеводородную плёнку толуола с нанесенной на поверхность плёнки пеной, и поверхность воды, очищенная от пленки углеводорода.

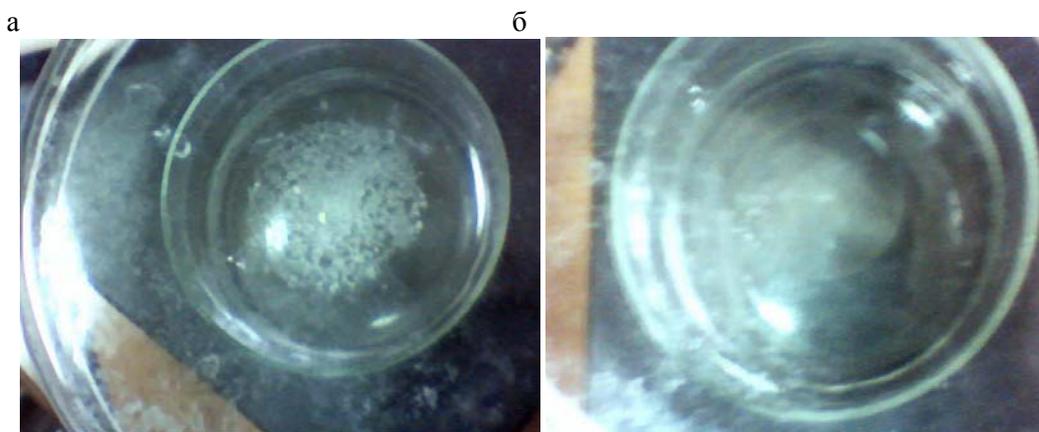


Рис.2. Углеводородная плёнка на поверхности воды с нанесенным сорбентом (а) и очищенная от углеводорода поверхность воды (б)

При изучении устойчивости тонких слоев пены (в зависимости от концентрации твердой фазы и гидрофобизатора) было установлено [3], что наиболее устойчивыми являются дисперсные системы с содержанием аэросила 4–6 %. Для таких пен характерна малая скорость синерезиса, что обусловлено увеличением вязкости дисперсионной среды при повышении концентрации твердой фазы и процессами образования гелевых пространственных структур. Тонкие слои таких пен не разрушались и сохраняли форму шаровой пены даже при ее сушке [4]. Однако для получения подобных дисперсных систем и дальнейшего их применения в качестве сорбентов важным является изучение изменения свойств дисперсионной среды с течением времени. Исследовалось изменение вязкости дисперсионной среды и напряжения сдвига с течением времени. Были приготовлены суспензии составов: 20 % людокс + 25 ммоль гексилamina (степень гидрофобизации поверхности 0,13 ммоль/г) и 2 % аэросил + 28 ммоль гексилamina (степень гидрофобизации 1,4 ммоль/г). Установлено образование подвижного неразрушающегося при встряхивании геля (уже через 2-3 суток) в суспензиях с большей степенью гидрофобизации частиц. Причем гелеобразование в исходной суспензии с течением времени коррелирует с замедлением скорости синерезиса в полученных из этих суспензий пенах. В результате кратность пены достигает некоторого максимального значения и остается неизменной до ее перехода в твердообразное и твердое состояние. Именно такие суспензии приводят к образованию структурированных пен.

При исследовании суспензий состава 20 % людокс + 25 ммоль гексилamina образование геля не наблюдали, в противоположность этому уже через сутки в результате седиментации формировался осадок частиц кремнезема, образования устойчивых

твердых дисперсных систем из таких суспензий не наблюдали. Изменение напряжения сдвига в исходных суспензиях со временем также является важным критерием формирования устойчивых твердых сорбентов. В частности, установлено, что напряжение сдвига в суспензиях состава 0,5 % людокс+11 ммоль гексиламина в начальный момент времени и через 30-60 минут от начала опыта было равно нулю. В суспензиях состава 0,5 % (или 20 %) людокс + 22 ммоль гексиламина наблюдали формирование структур, не разрушающихся при возрастании нагрузки до $80 \cdot 10^{-6}$ Н и более. Такая зависимость была характерна для суспензий, содержащих те же количества твердой фазы и большие концентрации гексиламина (33–100 ммоль/л).

В табл. 1 представлен один из разработанных нами составов исходной суспензии, содержащей кремнезем (6 %), ПАВ (0,59 %) и воду (93,43 %).

Т а б л и ц а 1

Применение сухой пены, полученной на основе аэросила-380

№ п/п	Состав пены	Объем воды, мл	Масса пены, мг	Объем углеводорода, мл	Степень удаления углеводорода, %
1	Вода – 93,43 % SiO ₂ – 6 % Гексиламин – 0,59 %	35	15	0,2	50
2	То же	35	18	0,2	100

Были проделаны опыты по очистке воды пеной. Нанесение на поверхность пятна пены (табл. 1, образец 2) в количестве 59 мг приводило к полному удалению пленки. Дальнейшие исследования были направлены на эмпирический подбор минимального количества сухой пены, достаточного для удаления пленки. В каждом опыте проводили фотографирование поверхности воды.

Масса сухой пены в количестве 18 мг является достаточной для полного удаления пленки. В частности, на рис. 2а показана сухая пена (образец 2), нанесенная на поверхность водной фазы; на рис. 2б представлена поверхность воды, очищенная от углеводородной пленки.

Расход сухой пены в расчете на 1 грамм углеводорода составляет 0,1 грамма. Сорбционную емкость (S_q) полученного материала рассчитывали по формуле

$$S_q = C_0 / C_s,$$

где C_0 и C_s – массы (в граммах) толуола и твердого сорбента, необходимого для полного удаления углеводорода. S_q пены, полученной из суспензии образца 2 (см. табл. 1), составляет 10.

Были проделаны опыты по очистке воды пеной, полученной из золя Ludox HS-40 с исходным нанометрическим размером частиц (степень гидрофобизации поверхности 0,3 ммоль/г). Доказано, что уменьшение размера частиц позволяет использовать меньшие количества пены для обработки воды. Установлено, что добавление 14 мг пены состава 20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 59,4 ммоль/л гексиламина является достаточным для полного удаления 0,2 мл углеводорода. Сорбционная емкость такого материала составляет 12,9*.

Большая гидрофобизация поверхности и повышение концентрации гексиламина в исходной суспензии до 110 ммоль приводили к некоторому увеличению количества сухой пены для качественной обработки воды.

Установлено, например, что добавление 6 мг пены состава 20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина (табл. 2) является недостаточным для полного удаления углеводорода. В этом случае остается 1/5 исходной площади. Количество пены, достаточное для полного удаления углеводорода, равно 16 мг; сорбционная емкость такого материала составляет 11,3. Таким образом, на свойства твердых

* Сорбционная емкость представляет собой отношение массы сорбированного углеводорода (г) к массе сухого сорбента (г).

пен-сорбентов оказывают влияние степень гидрофобности твердых частиц и напряжение сдвига исходных суспензий. Хотя при увеличении гидрофобности исходных частиц возрастает их смачиваемость толуолом, возможно уменьшение удельной поверхности полученного твердого материала на стадии его формирования и сорбционной емкости.

Т а б л и ц а 2

Применение сухой пены, полученной на основе золя Ludox HS-40

№ п/п	Состав пены	Объем воды, мл	Масса пены, мг	Объем углеводорода, мл	Степень удаления углеводорода, %
1	20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 59,4 ммоль/л гексиламина	35	14	0,2	100
2	20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	35	6	0,2	80
3	20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	35	14	0,2	90
4	20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина	35	16	0,2	100

Для получения пен, стабилизированных твердыми частицами, и их применения для очистки поверхности воды от пленки толуола оптимальным является следующий состав исходной суспензии: 20 % Ludox HS-40 + 5 ммоль/л хлорида натрия + 110 ммоль/л гексиламина. Сорбционная емкость твердого материала составляет 11,3.

Список литературы

1. Gonzenbach U.T, Studart A.R., Tervoort E. and Gauchkler L.J. // *Langmuir*. – 2006. – 22. – P. 10983–10988.
2. Gonzenbach U.T, Studart A.R., Tervoort E. and Gauchkler L.J. // *Langmuir*. – 2007. – 23. – P. 1025–1032.
3. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilкова N.G., Karakashev S.I. // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – 165. – P.108–116.
4. Vilкова N.G., Elaneva S.I., Kruglyakov P.M., Karakashev S.I. // *Mendeleev Commun.* – 2011. – 21. – P. 344-345.
5. Пены, стабилизированные твердыми частицами / С.И. Еланева, А. Колесников, Н.Г. Вилкова, П.М. Кругляков // *Определение краевых углов: сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых и исследователей*. – Пенза: ПГУАС, 2010. – С.99–102.
6. Руководство к практическим работам по коллоидной химии / О.Н. Григоров [и др.]. – М.: Химия, 1964.

References

1. Gonzenbach U.T, Studart A.R., Tervoort E. and Gauchkler L.J. // *Langmuir*. – 2006. – 22. – P. 10983–10988.
2. Gonzenbach U.T, Studart A.R., Tervoort E. and Gauchkler L.J. // *Langmuir*. – 2007. – 23. – P. 1025–1032.
3. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilкова N.G., Karakashev S.I. // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – 165. – P.108–116.
4. Vilкова N.G., Elaneva S.I., Kruglyakov P.M., Karakashev S.I. // *Mendeleev Commun.* – 2011. – 21. – P. 344-345.
5. Foam stabilized solid particles. Definition of contact angles. Collection of reports of International scientific-technical conference of young scientists and researchers / S.I. Elaneva, A. Kolesnikov, N.G. Vilкова, P.M. Kruglyakov. – Penza: PGUAS, 2010. – P. 99–102.
6. Guide to practical tasks on colloidal chemistry / O.N. Grigorov [etc.]. – M.: Chemistry, 1964.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Обухов Иван Алексеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Инженерная экология»

Москалец Павел Викторович,
кандидат биологических наук, доцент
кафедры «Инженерная экология»
E-mail: nirs@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Obukhov Ivan Alekseevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Engineering ecology»

Moscalets Pavel Viktorovich,
Candidate of Biological Science,
Associate Professor of the department
«Engineering ecology»
E-mail: nirs@pguas.ru

ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

И.А. Обухов, П.В. Москалец

Предложен и обоснован новый способ защиты населения от аварий, вызванных химически опасными веществами путем их рассеивания в атмосфере с помощью защитной, направленной вертикально вверх плоской струйной газовоздушной завесы.

Ключевые слова: защита населения, концентрация, защитная завеса, аварийная ситуация, зона заражения.

PROTECTION OF POPULATION AND TERRITORIES IN EMERGENCY SITUATIONS

I.A. Obukhov, P.V. Moscalets

A new way of protection the population in the accidents with chemically dangerous substances by their dispersion in the atmosphere with the help of protective vertically upwards directed flat jet of gas and air veil is offered and proved.

Keywords: protection of the population, concentration, protective veil of, emergency situation, zone of contamination.

Потенциальная опасность аварийных ситуаций с выливом (выбросом) химически опасных веществ на использующих их предприятиях и транспорте существует всегда. В силу ряда техногенных причин в последние годы наметилась тенденция роста числа аварийных ситуаций на химически опасных объектах.

В случае аварий на производствах, использующих аварийно химически опасные вещества (АХОВ) (далее – вещества), в окружающую среду выливается или выбрасывается значительное количество таких веществ. Образующееся облако их паров, опасное для жизни людей, распространяется в атмосфере.

На размеры зоны заражения влияют физико-химические и токсикологические характеристики вещества, скорость ветра, температура окружающей среды, количество вылившегося вещества и т.д. Существенное влияние оказывает вертикальная устойчивость атмосферы. Инверсия воздушного потока способствует распространению облака на более значительные расстояния от места аварии, чем изотермия или конвекция. Наименьшая глубина наблюдается при конвекции.

При разработке инженерно-технических мероприятий по защите населения в чрезвычайных ситуациях применяют обычно стандартные способы защиты: строительство убежищ и укрытий, эвакуацию населения, применение индивидуальных средств [1-3]. Высокая скорость формирования и действия поражающих факторов при аварийных ситуациях с АХОВ приводит к тому, что указанные традиционные методы

защиты оказываются недостаточно эффективными и не могут гарантировать надежную защиту населения [4]. Все они отличаются большими экономическими затратами и носят пассивный характер.

Здесь излагается принципиально новый способ активной защиты населения, позволяющий значительно снизить заражение приземного слоя атмосферы в сельтебной зоне в случае появления источника заражения вблизи населенного пункта. Это достигается путем рассеивания АХОВ в атмосфере с помощью защитной приземной направленной вертикально вверх плоской струйной газовой завесы, расположенной между источником заражения и населенным пунктом и имеющей в плане форму дуги с центром в источнике заражения [5].

Защитная завеса благодаря силам вязкостного трения вызывает подъем прилегающих с обеих сторон слоев воздуха от поверхности на высоту, зависящую от мощности завесы и метеоусловий. Двигающееся по ветру со скоростью V от источника заражения облако веществ при приближении к защитной газовой завесе изменяет свою траекторию так, что приземная часть облака поднимается на высоту H газовой завесы. Поскольку подъем воздуха завесой осуществляется и с ее подветренной стороны, то после завесы облако АХОВ не опускается к поверхности, а рассеивается в атмосфере. При этом концентрация веществ в приземном слое по пути движения облака будет значительно ниже, чем без его подъема газовой завесы.

Рассеивающее воздействие защитная завеса оказывает на любые вещества поскольку характер и количественные закономерности рассеивания газовых и паровых примесей не зависят от вида вещества. Эффективность завесы по снижению концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в основном зависит от высоты завесы и метеоусловий.

Рассмотрим ситуацию с выливом 70 т (стандартная емкость для хранения АХОВ) концентрированной соляной кислоты. Источник заражения находится на расстоянии 4 км от населенного пункта, кислота разлилась свободно по подстилающей поверхности слоем толщиной 0,05 м виде квадратного пятна со стороной 34 м. Метеорологические условия: температура воздуха 20 °С; ветер со скоростью 3 м/с направлен от источника заражения в сторону населенного пункта, степень вертикальной устойчивости атмосферы – изотермия.

Расчет глубины зоны заражения выполнен по методике [6] и ее величина $\Gamma=4,9$ км. Время действия источника испарения кислоты 1,71 ч. Интенсивность испарения хлористого водорода 4207 г/с. Поскольку расстояние от источника заражения до населенного пункта (4 км) меньше глубины заражения $\Gamma=4,9$ км, населенный пункт попадает в зону заражения. Скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха зависит не только от скорости ветра, но и от состояния атмосферы (от степени ее вертикальной устойчивости). Она всегда превышает скорость ветра и для заданных метеоусловий согласно методике [6] составляет 18 км/ч, в результате чего фронт облака достигает населенного пункта через 13,3 мин после аварии. За такое малое время практически невозможно обеспечить оповещение и эвакуацию жителей, что неизбежно приведет к поражению людей хлористом водородом.

Методика [6] позволяет рассчитать только глубину зоны заражения. Определить изменение концентрации веществ в приземном слое атмосферы вдоль пути распространения облака позволяет методика ОНД – 86 [7]. Расчет рассеивания выполнен с помощью универсальной программы расчета загрязнения атмосферы «Эколог», версия 3.0 реализующей основные зависимости методики [7]. Исходные данные для расчета указаны ранее.

На расстоянии 40 м от источника заражения в направлении населенного пункта сразу после аварии введена в действие защитная завеса длиной 60 м. Примеси от источника заражения в приземном слое распространяются в виде расходящегося факела с осью по направлению ветра. При заданных метеоусловиях в зону действия защитной завесы длиной 60 м попадает 95 % содержащегося в факеле хлористого водорода. Защитная завеса обеспечивает подъем нижней части распространяющегося от источника заражения облака хлористого водорода на некоторую эффективную

высоту H . В этом случае считаем, что последующее рассеивание хлористого водорода происходит от эквивалентного линейного источника длиной 60 м и высотой H . Остальные условия те же, что и в примере 1: выброс хлористого водорода 4207 г/с, скорость ветра 3 м/с, изотермия, температура воздуха 20 °С. Результаты расчетов показывают, что с увеличением высоты завесы вдвое (от 5 до 10 м, от 10 до 20 м и от 20 до 40 м) примерно вдвое возрастает и ее эффективность.

Эффективность завесы зависит от степени вертикальной устойчивости атмосферы, скорости ветра, высоты завесы и ее длины, расстояния от источника заражения.

Длина завесы связана с расстоянием от источника заражения. Имея данные о характере вертикального и горизонтального (по нормали к оси факела) распределений концентрации в факеле от наземного источника, длину легко рассчитать. Естественно, завеса должна быть расположена как можно ближе к источнику. В этом случае можно уменьшить ее длину и увеличить мощность и, таким образом, повысить эффективность. Кроме того, при уменьшении длины завесы поступление воздуха в разреженную зону за завесой будет осуществляться преимущественно горизонтально и будет слабо влиять на аэродинамику факела. Поскольку действующие на данный момент методики [6,7] не предназначены для решения указанных вопросов, все сказанное требует значительных теоретических и экспериментальных исследований.

В настоящее время основным и единственным реализованным на практике способом формирования вертикальной плоской приземной газовой завесы является вдув воздуха через длинную щель шириной b с однородной начальной скоростью V_0 [8]. Основными параметрами, определяющими высоту подъема (дальность) струи, являются ширина щели b и величина начальной скорости V_0 . При этом достаточно подробно исследовано истечение плоских турбулентных струй в неподвижную среду или в спутный поток – известны зависимости для расчета ширины струи, профилей скорости, температуры и концентрации, а также для изменения их максимальных величин вдоль оси струи [9].

Защитная газоздушная струя, предназначенная для подъема движущегося облака, вдувается вертикально не в неподвижную атмосферу, а в поперечный сносящий поток воздуха. Здесь структура течения существенно усложняется и отличается от течения в обычной затопленной струе или в струе в спутном потоке. Основной горизонтальный поток, набегая на струю со скоростью V , тормозится, создавая на передней к потоку стороне струи повышенное по сравнению с ее тыльной областью давление [10]. Под действием перепада давлений траектория струи искривляется. Давление и скорость на передней границе образованной струей «тела», обтекаемого сносящим потоком, непрерывно изменяются. Поэтому в струе существуют продольный и поперечный градиенты давления. За струей образуется зона циркуляции. Между зоной и струей происходит непрерывный обмен импульсом и веществом. Давление в циркуляционной зоне ниже атмосферного и зависит от отношения скоростных напоров струи и потока. Давление на передней к потоку (лобовой) поверхности струи изменяется от значения, несколько большего атмосферного в носике «тела», образованного струей (где скорость сносящего потока, обтекающего струю, равна 0) до пониженного давления, которое на значительном участке струи близко к атмосферному или меньше его. Возникающее за струей разрежение оказывает существенное влияние на ее характеристики и, прежде всего, на траекторию струи и ее дальность.

Задачи истечения плоских струй в поперечный сносящий поток являются значительно более сложными, чем задачи истечения в однородный спутный поток, и в настоящее время решены только для изотермической струи, причем в самых общих чертах. Имеющиеся ограниченные экспериментальные данные по исследованию характеристик течения в таком процессе [10] позволяют записать следующие приближенные соотношения для определения высоты подъема H газоздушной завесы:

$$H/b=6V_0/V. \quad (1)$$

В нашем случае H – это расстояние по вертикали до оси струи на горизонтальном ее участке (имеется в виду, что воздушная среда становится пологой под напором облака ядовитых веществ). Если это соотношение переписать таким образом

$$V_0 \cdot b = V \cdot H / 6, \quad (2)$$

то получается весьма важный и имеющий отчетливый физический смысл результат: для того чтобы обеспечить поток атмосферного (ветра) со скоростью V на высоту H и выше от поверхности земли, необходимо через щель вдувать поток воздуха объемным расходом $V_0 \cdot b$, составляющим $1/6$ объемного расхода $V \cdot H$ потока атмосферного воздуха высотой H от поверхности земли.

С помощью соотношения (1) можно выполнить оценочные расчеты параметров газовой завесы для рассмотренных выше случаев. Пусть при скорости ветра $V = 3$ м/с необходимо создать плоскую защитную струйную газозавесу высотой $H = 50$ м методом ддува вертикально вверх ненагретого атмосферного воздуха. Для этого при скорости ддува $V_0 = 15$ м/с необходимо использовать линейную щель шириной $b = HV/6V_0 = 50 \cdot 3 / 6 \cdot 15 = 1,67$ м. Или, другими словами, для формирования одного погонного метра $l = 1$ м плоской газозавесы высотой 50 м при этих условиях нужно обеспечить начальный объемный расход воздуха $Q_1 = l \cdot b \cdot w_0 = 1 \cdot 1,67 \cdot 15 = 25$ м³/с или 90000 м³/ч. Очевидны значительные затраты механической энергии для обеспечения такого большого расхода ддуваемого воздуха. Физически это объясняется достаточно просто: газозавесная завеса должна приподнять весь набегающий поток воздуха на высоту H . Чем больше скорость ветра и высота подъема, тем больше объем приподнимаемого воздуха и тем больше необходимы затраты энергии для этой цели.

Обычно ддуваемый через щель воздух забирается так же из атмосферы. Для того, чтобы обеспечить забор воздуха из атмосферы и вдувать его через щель со скоростью V_0 , необходимо с помощью нагнетательного устройства (вентилятора) создать перепад давления Δp (без учета потерь давления при течении сквозь канал), который затем при истечении воздуха через сужающийся щелевидный насадок преобразуется в кинетическую энергию потока $\rho V_0^2 / 2$ (ρ – это плотность воздуха). Если учесть, что через длину $l = 1$ м щели истекает объемный поток воздуха Q_1 , то для реализации этого процесса необходимо обеспечить полезную мощность вентилятора Вт:

$$N_1 = Q_1 \cdot \Delta p = l \cdot V_0 \cdot \Delta p = l \cdot 0 \cdot b \cdot \rho \cdot w_0^2 / 2. \quad (3)$$

Отсюда с учетом соотношения (2) получаем окончательное выражение

$$N_1 = H \cdot V \cdot \rho \cdot V_0^2 / 12, \quad (4)$$

позволяющее рассчитать мощность N_1 , необходимую для формирования одного погонного метра $l = 1$ м газозавесы высотой H в поперечном потоке атмосферного воздуха V за счет истечения вторичного воздуха плотностью ρ со скоростью V_0 через щель длиной $l = 1$ м.

Выполним оценку энергетических затрат на формирование воздушной завесы для рассмотренных ранее скоростей ветра $V = 3$ м/с и ддува $V_0 = 15$ м/с при обычных условиях ($\rho = 1,2$ кг/м³).

Исходя из выражения (4), получаем линейную зависимость затрачиваемой мощности от высоты завесы:

$$N_1 = 0,1 \cdot H \cdot V \cdot V_0^2 = 0,1 \cdot 3 \cdot 225 \cdot H = 67,5 \cdot H. \quad (5)$$

Для завесы высотой $H = 50$ м получаем $N_1 = 3375$ Вт. Для завесы $L = 100$ м общая мощность составит величину $N = N_1 \cdot L = 337,5$ кВт. Это без учета каких-либо потерь мощности в устройстве. Затраты такой мощности вполне реальны.

1. Капашин, В.П. Научно-технические аспекты обеспечения безопасности при хранении и уничтожении химического оружия / В.П. Капашин, И.Н. Кротович, А.В. Синманский // Федеральные и региональные проблемы уничтожения химического оружия. – М.: ВИНТИ, 2000. – Вып.2. – С. 85–112.
2. Зюзин, А.В. Защита производственного персонала и населения от сильно действующих ядовитых веществ на химических объектах / А.В. Зюзин, В.Н. Семенов. – М.: ТОО «Мединар», 1994.
3. Синманский, А.В. Обеспечение безопасности хранения и уничтожения ОВ / А.В. Синманский // Состояние окружающей среды в районе хранения ХО и места размещения будущего объекта по его уничтожению: сб. материалов общественных слушаний. – Пенза: ПДЗ. – С. 5–13.
4. Катастрофа и человек: Книга 1. Российский опыт противодействия чрезвычайным ситуациям / под ред. Ю.Л. Воробьева. – М.: АСТ-ЛТД, 1997. – 256 с.
5. Обухов, И.А. Способ активной коллективной защиты населения от ядовитых или отравляющих веществ. Патент РФ № 2179046. БИ № 4, 2002 / И.А. Обухов, В.А. Майоров.
6. РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. – Л.: Гидрометеиздат, 1991.
7. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
8. Эльтерман, В.М. Воздушные завесы / В.М. Эльтерман. – М.: Машиностроение, 1966. – 164 с.
9. Теория турбулентных струй / под ред. Г.Н.Абрамовича. – М.: Наука. 1984. – 715 с.
10. Гиршович, Т.А. Турбулентные струи в поперечном потоке / Т.А. Гиршович. – М.: Машиностроение, 1993. – 256 с.

References

1. Kapaschin, V.P. The scientific and technical aspects of ensuring security during storage and destruction of chemical weapons / V.P. Kapaschin, I.N. Krotovich, A.V. Sinmanskij // Federal and regional problems of chemical weapons destruction. – М.: VINITI, 2000. – Issue 2. – P. 85–112.
2. Zyuzin, A.V. Protection of the manufacturing personnel and the population of highly active poisonous substances at chemical facilities / A.V. Zyuzin, V.N. Semenov. – М.: LLP «Medinar», 1994.
3. Sinmanskij, A.V. Ensuring the safety of storage and destruction of warfare agents / A.V. Sinmanskij // State of the environment in the area of CW stockpiling and location of the future object of its destruction: collection of materials of public hearings. – Penza. – P. 5–13.
4. Catastrophe and man: Book 1. The Russian experience of counteraction to extreme situations / Under ed. Yu.L. Vorobyov. – М.: AST-LTD, 1997. – 256 p.
5. Obukhov, I.A. The method of active collective protection of the population from the poisonous or toxic substances. Patent of Russian Federation № 2179046. BI № 4, 2002 / I.A. Obukhov, V.A. Mayorov.
6. KMG 52.04.253-90. Methodology of forecasting the extent of intrusion virulent poisonous substances at failures (destructions) of the chemically hazardous objects and transport. – L.: Gidrometeoizdat, 1991.
7. Ond-86. Methods of calculation of concentrations in the atmospheric air of harmful substances contained in the emissions of the enterprises. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – 93 p.
8. Elterman, V.M. Air curtains / V.M. Elterman. – М.: Machinery, 1966. – 164 p.
9. The theory of turbulent jets / under ed. G.N.Abramovich. – М.: Science. 1984. – 715 p.
10. Grischovich, T.A. Turbulent jet in the cross-flow / T.A. Grischovich. – М.: Engineering, 1993. – 256 p.

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

Горшков Валентин Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Мирошниченко Денис Сергеевич,
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Святкина Анна Александровна,
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, заведующий
кафедрой «Кадастр недвижимости
и право»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Gorshkov Valentin Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»

Miroshnichenko Denis Sergeevich,
Postgraduate of the department «Heat, gas
supply and ventilation»

Svyatkina Anna Aleksandrovna,
Postgraduate of the department «Heat, gas
supply and ventilation»

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Head of the department
«Cadastral survey of real estate and lan»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.И. Горшков, Д. С. Мирошниченко, А.А. Святкина, О.В. Тараканов

На основе многомерных стохастических ветвящихся процессов разработана методика расчета безотказности вентиляционных систем. Проведено сравнение результатов расчетов параметров безотказности вентиляционных систем, полученных по предложенной методике и существующей. Показано, что предложенная методика является более адекватной за счет учета деградации параметров сборочных единиц при эксплуатации вентиляционных систем.

Ключевые слова: вентиляционная система, независимые отказы, ветвящиеся процессы, безотказность работы.

FORECASTING OF VENTILATION SYSTEMS FAILURE

V.I. Gorshkov, D. S. Miroshnichenko, A.A. Svyatkina, O. V. Tarakanov

Based on multivariate stochastic branching processes a method for predicting failure of ventilation systems has been developed. We compare the results of calculations of reliability parameters of ventilation systems, obtained by the proposed method and the existing one have been compared. It is shown that the proposed method is more appropriate due to the inclusion of degradation parameters of assembly units for operation of ventilation systems.

Keywords: ventilation system, independent failures, branching processes, trouble-free operation.

Стохастические ветвящиеся процессы [1] описывают широкий круг явлений, связанных с размножением, гибелью и превращением каких-либо объектов: частиц в физике, молекул в химии, нейронов в ядерных реакторах и т.п. Стохастический ветвящийся процесс определяется как марковский процесс со счетным числом состояний, переходные вероятности которого удовлетворяют еще дополнительному условию ветвления [1].

Применение стохастических ветвящихся процессов в теории надежности является пионерским. Существующие в настоящее время в теории надежности методики [2] не позволяют в полной мере решать задачи, связанные с прогнозированием безотказности технических систем, значения интенсивностей отказов элементов которых отличаются

в 10–100 раз и более, а также дополнительного ресурса систем после их технического обслуживания.

При создании вентиляционных систем их отладки перед разработчиком стоит несколько задач:

- выбор архитектуры вентиляционных систем (модулей);
- выбор измерительного оборудования для вентиляционных систем;
- расчёт характеристик безотказности модулей вентиляционных систем с целью определения уровня надежности объектов.

Решение этих взаимосвязанных задач опирается на контроль предельного значения показателя безотказности вентиляционных систем. Поэтому необходима модель прогнозирования отказов, позволяющая рассчитывать основные показатели безотказности вентиляционных систем, состоящих из сборочных единиц, интенсивности отказов которых резко отличаются (в 10–100 раз) и являются известными на начало жизненного цикла.

Целью работы является разработка методики расчета безотказности вентиляционных систем на основе многомерных стохастических ветвящихся процессов.

В терминах стохастических ветвящихся процессов [1] под «частицами» понимаем сборочные единицы вентиляционных систем, «гибель» сборочной единицы трактуем как ее внезапный отказ, «превращение» сборочной единицы трактуем как изменение ее технических параметров во времени в худшую сторону (постепенный отказ). Типы «частиц» – это сборочные единицы вентиляционных систем с определенными значениями технических параметров, объединенные в группы. Внутри группы сборочные единицы рассматриваются как однотипные. Ограничимся рассмотрением 4-мерных ветвящихся процессов – стохастическая система состоит из 4-х типов «частиц» (групп сборочных единиц).

Для оценки параметров безотказности вентиляционной системы сформируем из m сборочных единиц 4 группы (рис.1). Нумерация групп сборочных единиц производится с учетом степени деградации их параметров. С повышением номера группы увеличивается степень деградации параметров

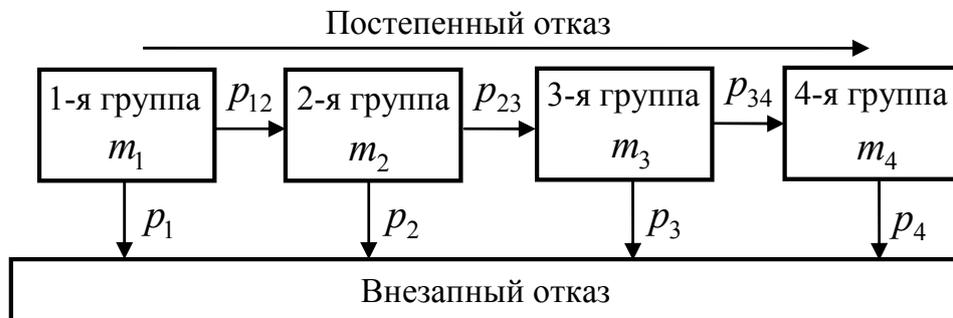


Рис.1. Расчетная схема прогнозирования независимых отказов вентиляционной системы:

m_1, m_2, m_3, m_4 – количество сборочных единиц в группах деградации

Постепенный отказ сборочных единиц в расчетной схеме (см. рис.1) моделируется следующим образом. За время Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) с вероятностью $p_{i,i+1}(\Delta t) = m_i \alpha_{i,i+1} \Delta t$ ($i = 1, 2, 3, 4$), где $\alpha_{i,i+1}$ – интенсивность переходов деградации, сборочная единица i -й группы переходит в $i+1$ -ю группу за счет деградации его параметров. При этом в i -й группе количество сборочных единиц уменьшается на единицу, а $i+1$ -й группе увеличивается на единицу.

Внезапный отказ сборочных единиц в расчетной схеме (см. рис.1) моделируется следующим образом. За время Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) с вероятностью $p_i(\Delta t) = m_i \beta_i \Delta t$ ($i = 1, 2, 3, 4$), где β_i – интенсивность отказов, параметры сборочной единицы i -й группы скачкообразно изменяются. При этом количество сборочных единиц, не имеющих отказа в i -й группе, уменьшается на единицу.

На рис.2 показана структура вероятностных переходов стохастического ветвящегося процесса, составленная на основе расчетной схемы (см. рис.1). Количество сборочных единиц в группах является величиной случайной $\mu_i(t)$ ($i=1,2,3,4$). Состояние сборочных единиц вентиляционной системы описываем случайным 4-мерным вектором [1] с координатами $M = (\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t), \mu_4(t))$. Вентиляционная система за время Δt переходит в одно из семи состояний, показанных на рис.2, или остается без изменения. Затем процесс повторяется и носит характер ветвления.

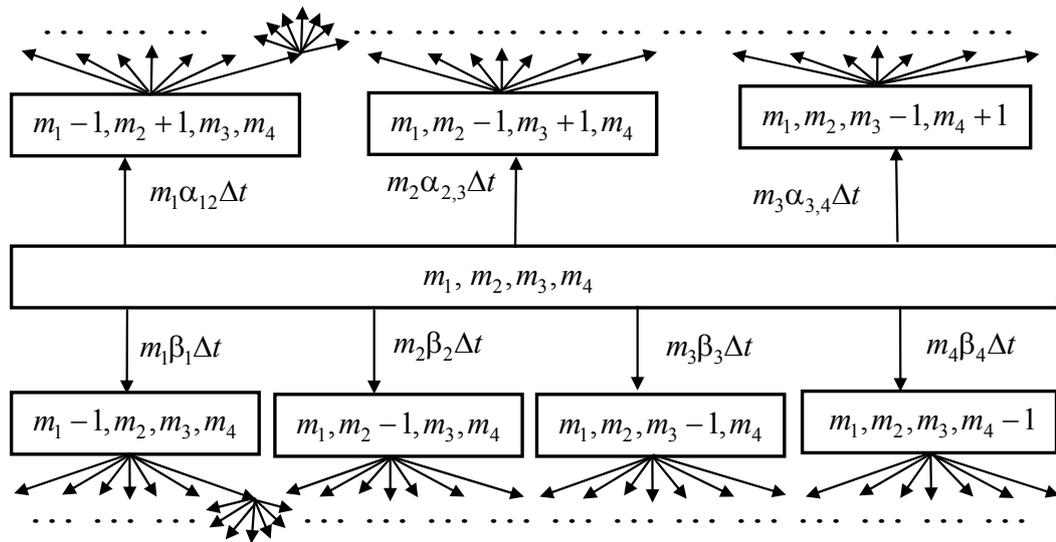


Рис.2. Структура вероятностных переходов 4-мерного стохастического ветвящегося процесса

Неизвестной величиной в ветвящемся процессе является $P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t) = P(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \mu_3(t) = m_3, \mu_4(t) = m_4)$ (вероятность того, что в момент времени t в 1-й группе находится m_1 элементов, во 2-й группе – m_2 , в 3-й группе – m_3 , в 4-й группе – m_4). Вероятность $P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)$ определяется из решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dP_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)}{dt} &= \frac{dP(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \mu_3(t) = m_3, \mu_4(t) = m_4)}{dt} = \\ &= \sum_{i=1}^4 (m_i + 1) \beta_i P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \dots, \mu_4(t) = m_4) + \\ &+ (m_i + 1) \alpha_{i, i+1} P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \mu_{i+1}(t) = m_{i+1} - 1, \dots, \mu_4(t) = m_4) - \\ &- m_i (\alpha_{i, j} + \beta_i) P(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \mu_3(t) = m_3, \mu_4(t) = m_4), \\ &m_{1,2,3,4} = 0, 1, 2, \dots, m, \quad m_1 + m_2 + m_3 + m_4 \leq m. \end{aligned} \quad (1)$$

Система уравнений (1) получена на основе структуры вероятностных переходов (см. рис.1) по методике [1].

Начальные условия решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) определим из начального состояния вентиляционной системы: в момент вре-

мени $t = 0$ в 1-й группе находятся m_1^0 элементов, во 2-й группе – m_2^0 , в 3-й группе – m_3^0 , в 4-й группе – m_4^0 . Вероятность этого события:

$$P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(0) = \begin{cases} 1, & \text{если } m_1 = m_1^0, m_2 = m_2^0, m_3 = m_3^0, m_4 = m_4^0, \\ 0, & \text{если } m_1 \neq m_1^0, m_2 \neq m_2^0, m_3 \neq m_3^0, m_4 \neq m_4^0. \end{cases} \quad (2)$$

В теории стохастических ветвящихся процессов используется аппарат производящих функций [1]. Он позволяет свести систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1) к дифференциальному уравнению в частных производных относительно производящей функции

$$F(t, x_1, x_2, x_3, x_n) = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{m_4=0}^{\infty} x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t), \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – переменные величины.

Дифференцируя производящую функцию $F(t, x_1, x_2, x_3, x_4)$ по переменным t, x_1, x_2, x_3, x_4 , получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{m_4=0}^{\infty} x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} \frac{dP_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)}{dt}, \\ x_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{m_4=0}^{\infty} m_i x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t), \\ x_{i+1} \frac{\partial F}{\partial x_i} = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{m_4=0}^{\infty} (m_i + 1) x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} P_{m_1, \dots, m_i+1, m_{i+1}-1, \dots, m_4}(t), \\ \frac{\partial F}{\partial x_i} = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{m_4=0}^{\infty} (m_i + 1) x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} P_{m_1, \dots, m_i+1, \dots, m_4}(t), \quad i = 1, 2, 3, 4. \end{array} \right. \quad (4)$$

Решая совместно выражения (1) и (4), получаем линейное дифференциальное уравнение в частных производных относительно производящей функции

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{i=1}^4 (\beta_i + \alpha_{i, i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i, i+1} + \beta_i) x_i) \frac{\partial F}{\partial x_i}. \quad (5)$$

Задача интегрирования линейного однородного уравнения (5) равносильна задаче интегрирования так называемой характеристической системы [3]

$$\frac{dx_1}{X_1} = \frac{dx_2}{X_2} = \frac{dx_3}{X_3} = \frac{dx_4}{X_4} = \frac{dt}{-1}, \quad (6)$$

где $X_i = \beta_i + \alpha_{i, i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i, i+1} + \beta_i) x_i$, $i = 1, 2, 3, 4$.

Решая характеристическую систему (6), определяем первые линейно независимые интегралы:

$$\varphi_i(t, x_1, x_2, x_3, x_4) = t - \frac{1}{\alpha_{i, i+1} + \beta_i} \ln(\beta_i + \alpha_{i, i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i, i+1} + \beta_i) x_i), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

Общее решение линейного однородного уравнения в частных производных (5) имеет вид [3]

$$F(t, x_1, x_2, x_3, x_4) = \phi(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4), \quad (8)$$

где ϕ – произвольная функция.

Функция $\phi(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$ определяется из начального условия (2) (вероятность $P_{m_1^0, m_2^0, m_3^0, m_4^0}(0) = 1$, все остальные вероятности равны нулю):

$$\phi(\varphi_1(0), \varphi_2(0), \varphi_3(0), \varphi_4(0)) = x_1^{m_1^0} x_2^{m_2^0} x_3^{m_3^0} x_4^{m_4^0}, \quad (9)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 находятся из решения следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\beta_i + \alpha_{i,i+1} x_{i+1} - (\alpha_{i,i+1} + \beta_i) x_i = \exp(-(\alpha_{i,i+1} + \beta_i) \varphi_i(0)), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

Решаем систему линейных алгебраических уравнений (10), определяем x_1, x_2, x_3, x_4 . Подставляем эти значения в уравнение (9) и определяем вид функции $\phi = \phi(\varphi_1(0), \varphi_2(0), \varphi_3(0), \varphi_4(0))$. Подставляя в функцию ϕ аргументы из выражения (7), получаем выражение для производящей функции:

$$F(t, x_1, x_2, x_3, x_4) = \prod_{i=1}^4 \left(N_i + \sum_{j=1}^4 M_{ij} x_j \right)^{m_i^0}, \quad (11)$$

где N_i, M_{ij} соответственно компоненты вектора \mathbf{N} и матрицы \mathbf{M} , которые определяются следующим образом:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{-1} \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}. \quad (12)$$

Здесь \mathbf{I} – единичная матрица,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -(\beta_1 + \alpha_{12}) & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -(\beta_2 + \alpha_{23}) & \alpha_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -(\beta_3 + \alpha_{34}) & \alpha_{34} \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \exp(-(\beta_1 + \alpha_{12})t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-(\beta_2 + \alpha_{23})t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-(\beta_3 + \alpha_{34})t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-\beta_4 t) \end{pmatrix}.$$

Вероятность $P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)$ определяется через производящую функцию следующим образом [1]:

$$P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t) = \frac{1}{m_1! m_2! m_3! m_4!} \frac{\partial^{m_1+m_2+m_3+m_4} F(t; 0, 0, 0, 0)}{\partial x_1^{m_1} \partial x_2^{m_2} \partial x_3^{m_3} \partial x_4^{m_4}}. \quad (13)$$

Математическое ожидание количества элементов, находящихся в группах деградации в момент времени t , определяется через производящую функцию следующим образом [1]:

$$M_k(t) = \frac{\partial F(t; 1, 1, 1, 1)}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (14)$$

Вычисляя производные от производящей функции $F(t, x_1, x_2, x_3, x_4)$ (16), получаем выражение математического ожидания количества элементов, находящихся в различных группах деградации (см. рис.1):

$$M_k(t) = \prod_{i=1}^4 \left(N_i + \sum_{j=1}^4 M_{ij} \right)^{m_i^0} \sum_{i=1}^4 m_i^0 \frac{M_{ik}}{N_i + \sum_{j=1}^4 M_{ij}}, \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (15)$$

Пусть $m_0^1 \neq 0, m_0^2 = 0, m_0^3 = 0, m_0^4 = 0$, тогда вероятность $P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)$ согласно выражению (13) определяется следующим образом:

$$P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t) = \frac{m_1^0!}{m_1! m_2! m_3! m_4! (m_1^0 - m_1 - m_2 - m_3 - m_4)!} \times \times N_1^{m_1^0 - m_1 - m_2 - m_3 - m_4} M_{11}^{m_1} M_{12}^{m_2} M_{13}^{m_3} M_{14}^{m_4}. \quad (16)$$

Получить $P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t)$ при $m_0^1 \neq 0, m_0^2 \neq 0, m_0^3 \neq 0, m_0^4 \neq 0$ весьма проблематично из-за сложности вычисления производных высших порядков от произведения функций.

Условием того, что отказа элементов в вентиляционной системе не будет, является $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m_1^0$. Тогда вероятность безотказной работы [3] системы противоаварийной защиты в течение времени t определяется следующим образом:

$$P(t) = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_1^0} \sum_{m_3=0}^{m_1^0} \sum_{m_4=0}^{m_1^0} P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t), \quad (17)$$

где $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m_1^0$.

Среднее время безотказной работы вентиляционной системы определяется следующим образом [3]:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_1^0} \sum_{m_3=0}^{m_1^0} \sum_{m_4=0}^{m_1^0} \int_0^{\infty} P_{m_1, m_2, m_3, m_4}(t) dt, \quad (18)$$

где $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m_1^0$.

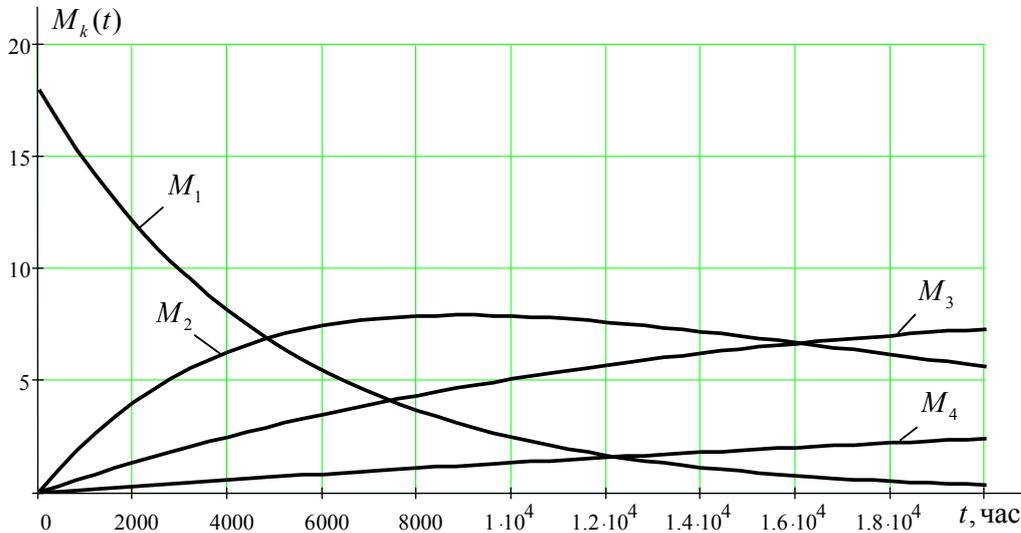


Рис.3. Распределение математических ожиданий элементов модулей вентиляционной системы по группам деградации во времени

На рис.3 показана зависимость математических ожиданий сборочных единиц вентиляционной системы в группах деградации от времени. Результаты расчетов получены при $\alpha_{12}=0,000198, \alpha_{23}=0,0000541, \alpha_{34}=0,0000126$ и интенсивностях отказов $\beta_1=4.95 \times 10^{-7}, \beta_2=9.95 \times 10^{-7}, \beta_3=1.98 \times 10^{-6}, \beta_4=4.95 \times 10^{-6}$. При таком выборе интенсивностей в момент времени $\tau = 9000$ ч математические ожидания количества сборочных единиц в группах деградации соответственно равны $M_1 = 3, M_2 = 8,$

$M_3 = 5$, $M_4 = 2$. Среднее время безотказной работы вентиляционной системы, полученное по предложенной методике, составляет $T = 7600$ ч, по существующей методике [2] – $T = 9000$ ч, из статистики эксплуатации вентиляционной системы производства фирмы «Ремак» – $T = 7000$ ч.

Зависимость вероятности безотказной работы вентиляционной системы от времени показана на рис.4. Из графика видно, что вероятность безотказной работы на уровне $P(t) = 0,8$ осуществляется при времени $t = 2000$ ч.

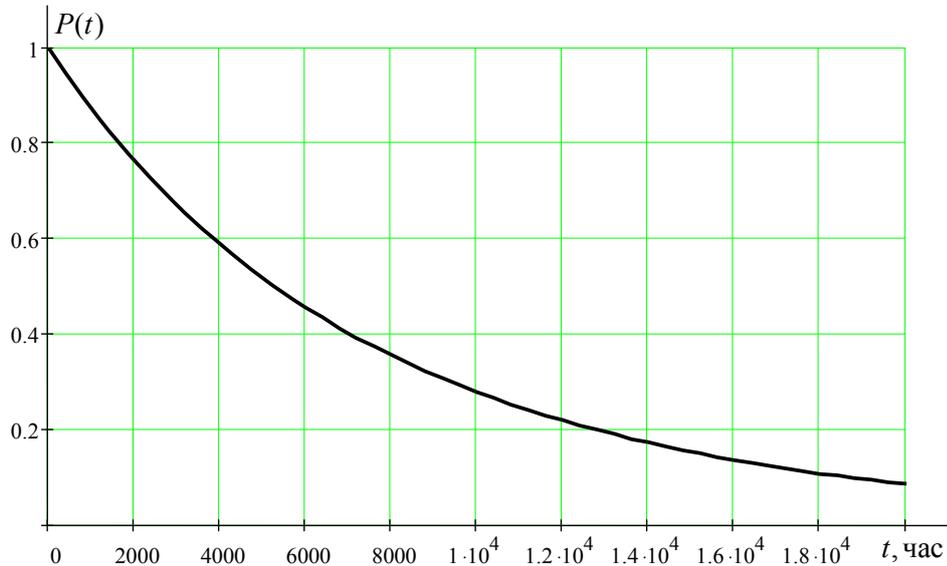


Рис.4. Вероятность безотказной работы вентиляционной системы в целом

Предложенная методика расчёта безотказности вентиляционных систем на основе многомерных стохастических ветвящихся процессов является более адекватной, чем существующая в настоящее время [2]. Она учитывает постепенный отказ сборочных единиц вентиляционных систем. Методику можно использовать и для прогнозирования дополнительного ресурса вентиляционных систем после технического обслуживания. Замена сборочных единиц, их ремонт моделируются как переход из групп с высокой степенью деградации в группы с более низкой степенью деградации (процесс, обратный для постепенного отказа).

Список литературы

1. Севастьянов, Б.А. Ветвящиеся процессы / Б.А. Севастьянов // Теория вероятностей и ее применение. – 1964. – Т.9. – №4. – С.577–594.
2. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
3. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 701 с.

References

1. Sevastyanov, B.A. Branching processes / B.A. Sevastyanov // Probability theory and its application. – 1964. – V.9. – № 4. – P. 577–594.
2. Polovko, A.M. Fundamentals of the theory of reliability / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. – 704 p.
3. Korn, H. Handbook of Mathematics / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1974. – 701 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Баканова Светлана Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Кубис Вячеслав Александрович,
старший преподаватель кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Bakanova Svetlana Viktorovna,
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Heat,
gas supply and ventilation»

Kubis Vjacheslav Aleksandrovich,
Senior Lecturer of the department «Heat, gas
supply and ventilation»

ПРЕДЕЛЬНО ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ

С.В. Баканова, В.А. Кубис

Изложены результаты экспериментальных исследований на модели помещения, загруженного скоропортящейся продукцией при воздушном охлаждении с вариантными решениями конструктивно-технологического оформления наружных ограждений. Обобщение полученных результатов проведено с использованием предельно вероятностного метода. Выявлено оптимальное решение, которое обеспечивает качественные условия хранения продукции при существенной экономии воздухообмена.

Ключевые слова: помещение хранения скоропортящейся продукции, воздухораспределение, пористый слой, структура слоя, предельно вероятностный метод, воздухообмен.

MAXIMUM PROBABILISTIC METHOD OF MICROCLIMATE ASSESSMENT IN STOREROOMS FOR PERISHABLE GOODS

S.V. Bakanova., V.A. Kubis

The results of experimental studies of the storeroom model with perishable goods under air-cooling with variants of structural and technological design of outdoor enclosures are given. The generalization of the results has been carried out using the maximum probability method. The optimal solution, which provides normal conditions of products storage assubstantial ventilation savings has been found.

Keywords: air distribution, porous layer, layer structure, the maximum-probability method, air.

В помещениях, загруженных скоропортящейся продукцией, с естественной или искусственной вентиляцией происходят взаимодействие приточных струй и конвективных потоков от наружных ограждений, вызывающих движение индуцируемых ими воздушных масс, а также инфильтрация.

Насыпь или штабель хранимой продукции рассматривается как пористый слой с присущей ему неоднородностью. Последнее вызывает неравномерное распределение параметров воздушной среды как в продольном, так и в поперечном направлении, что усугубляется неэффективной организацией воздухообмена. Следствием этого являются структурные образования и контрастность полей физических параметров воздушной среды. Структурные образования отличаются стохастической природой, поэтому задача выбора эффективных проектных решений систем воздушного охлаждения решается на основе экспериментального изучения распределения параметров воздуха на модели загруженного помещения путём обобщения полученных результатов статистическими методами.

Обоснование такого подхода и его конструктивные решения приведены в работе [1] применительно к механической общеобменной вентиляции и техническому кондиционированию. Однако воздушное охлаждение загруженных помещений имеет свои специфические особенности и вероятностно-статистическими методами практически не исследовано.

Рассмотрим модель помещения с вертикальной схемой воздушного охлаждения, с подачей воздуха «снизу–вверх» непосредственно в штабель мороженой рыбопродукции, с коэффициентом пористости 0,15. Между штабелем продукции и наружными теплоотдающими ограждениями имеется воздушный зазор (байпас), в котором установлено конструктивно-технологическое оформление («отделка») [2] в виде деревянных брусков сечением 50×50 мм.

В процессе исследований поставлена задача – выявить эффективность вертикальной схемы организации воздухообмена при вариантной «отделке» наружных ограждений, определить оптимальный вариант «отделки» в целях обеспечения требуемых параметров воздушной среды для сохранения качества продукции с учетом рациональности конструкции.

Исследованные варианты «отделки» I–IV с горизонтально расположенными брусками изображены на рис.1. Каждый из вариантов характеризуется определённой конфигурацией «отделки» и основным геометрическим параметром \bar{f} – площадью живого сечения для прохода воздуха в поперечном сечении байпаса.

Эффективность вертикальной схемы IV раздачи воздуха с принятыми вариантами «отделки» сопоставлена с результатами исследований традиционной «отделки» наружных ограждений вертикально расположенными брусками при $\bar{f}=0,75$. Кроме того, получены данные для схемы VI при отсутствии «отделки» ограждений, когда между штабелем и наружными ограждениями свободный байпас ($\bar{f}=1$).

Температуру воздуха в штабеле мороженой рыбопродукции измеряли для основного режима её изотермического хранения во всем интервале расходов воздуха, характерных для режима ускоренного охлаждения. Основные переменные параметры – теплоступление от наружных ограждений, величина воздухообмена, конструктивные особенности «отделки» ограждений и др.

Обобщенные закономерности вентиляционного процесса в штабеле продукции при теплоступлениях от наружных ограждений получены по результатам моделирования. Экспериментально установлено, что температурный симплекс $m_{\Delta t} = (t_{шт}^{yx} - t_{пр}) / (t^{yx} - t_{пр})$ – величина переменная ($t_{шт}^{yx}, t^{yx}$ – температура уходящего воздуха соответственно из штабеля и модели, °C): численное значение его возрастает с увеличением воздухообмена (рис. 2), т.е.

$$m_{\Delta t} = aG^c, \quad (1)$$

где G – массовый расход, кг/с; a, c – коэффициенты, определяемые из опыта (табл.1).

Испытанная система воздушного охлаждения с вариантами «отделки» характеризуется различными коэффициентами $m_{\Delta t}$: максимальное его значение характерно для схемы I ($\bar{f}=0$), которая способствует втеканию «теплого» воздуха из байпаса в штабель продукции, минимальное – для схемы III ($\bar{f}=0,25$), исключаяющей втекание воздуха в штабель.

Превышение температуры воздуха в штабеле продукции $\Delta t_{шт}^{cp} = t_{шт}^{cp} - t_{пр}$ ($t_{шт}^{cp}$ – средняя температура воздуха в штабеле продукции, °C) определяли из уравнения теплового баланса с учетом выражения (1):

$$\Delta t_{шт}^{cp} = aQ / (0,24G^{1-c}), \quad (2)$$

где Q – тепловыделения, Вт.

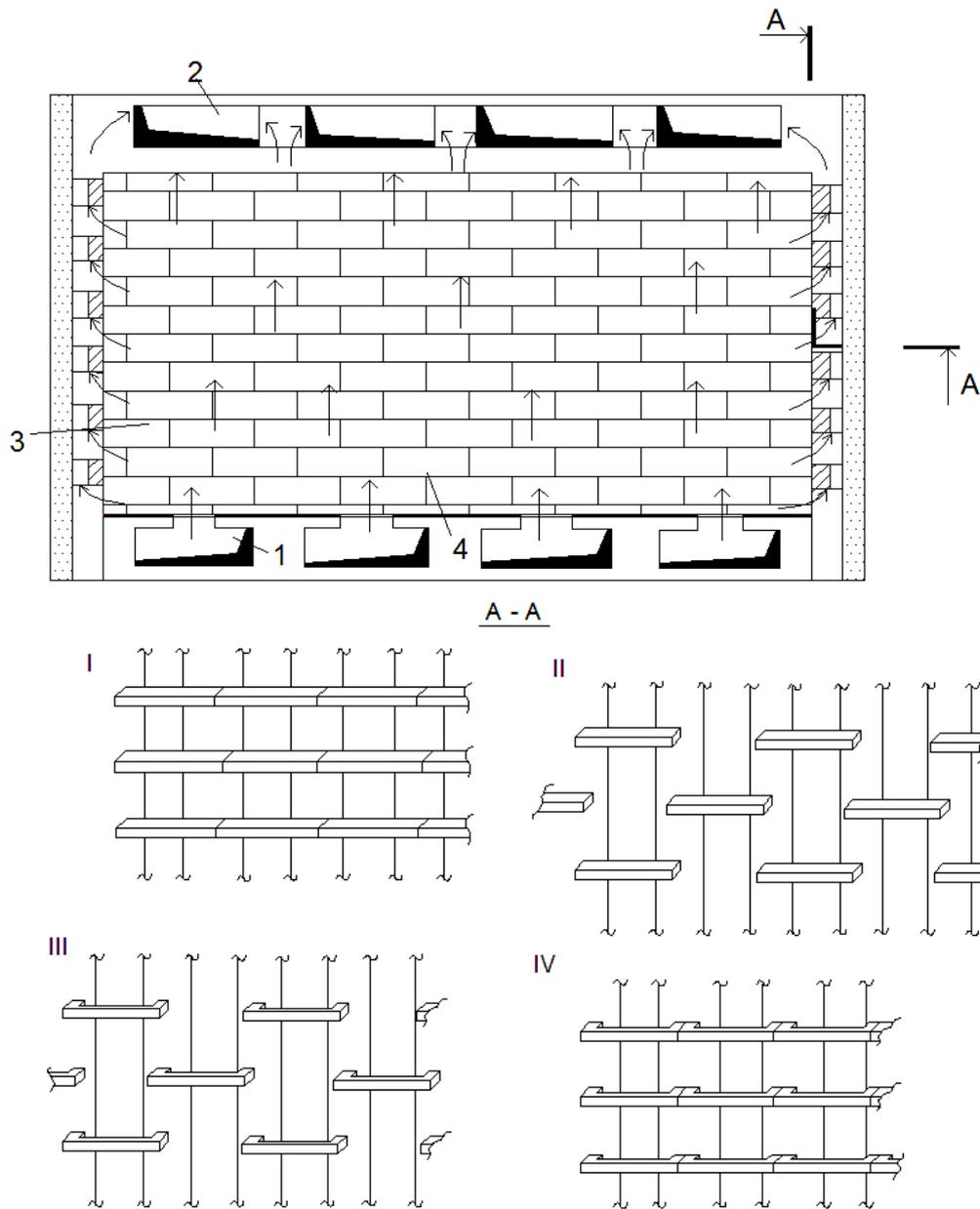


Рис. 1. Вертикальная система воздухораспределения в помещениях хранения скоропортящейся продукции с вариантами конструктивно-технологического оформления наружных ограждений:

I – IV – схемы соответственно при $\bar{f} = 0; 0,14; 0,25; 0,28$;

1 – воздуховоды для подачи воздуха в штабель; 2 – вытяжные отверстия;
3 – байпас с конструктивно-технологическим оформлением; 4 – штабель

Закон распределения температур в штабеле продукции близок к нормальному. По обобщенным результатам экспериментов нормированный аргумент x в функции Лапласа можно принять равным $x^* = mx + n$ (m, n – опытные коэффициенты). Кроме того, установлено, что «отделка» наружных ограждений оказывает существенное влияние на статистические показатели рассеяния температур в вентилируемом объеме, а следовательно, на формирование пространственного распределения температур в слое продукции. Так, изменение среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta t}$ при любой из рассматриваемых схем воздухораспределения пропорционально тепловой нагрузке; с ростом воздухообмена поле температур выравнивается, о чем свидетельствует

уменьшение $\sigma_{\Delta t}$; наиболее равномерное поле температур формируется при схеме III, неравномерное – при схеме I (рис. 3).

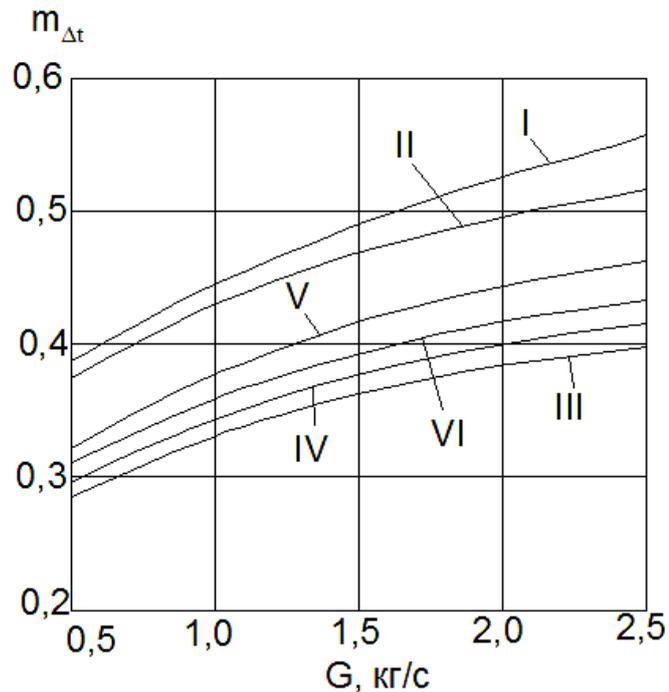


Рис. 2. Зависимость $m_{\Delta t}$ от количества подаваемого воздуха G при $\bar{f} = \text{var}$:

I – VI – схемы соответственно при $\bar{f} = 0; 0,14; 0,25; 0,28; 0,75; 1,00$.

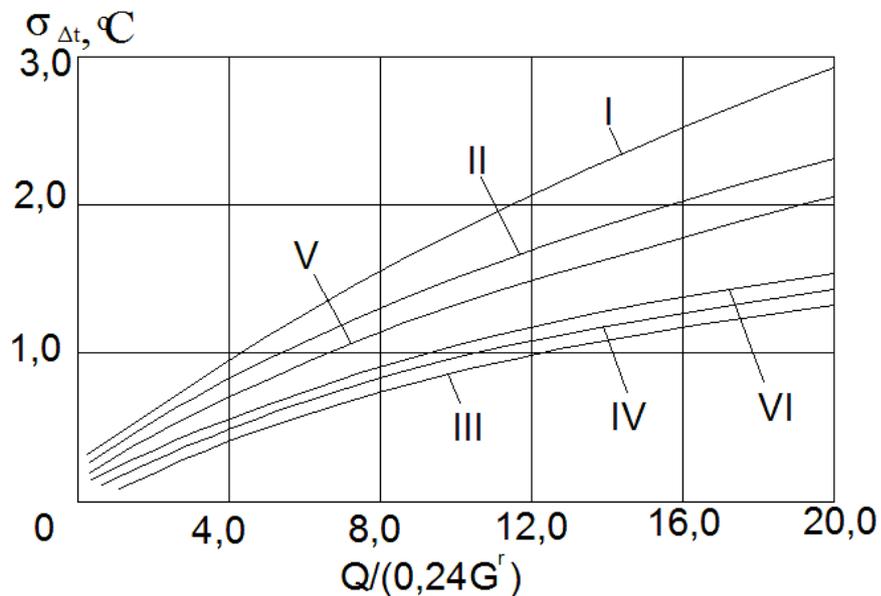


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения от воздухообмена и теплопоступлений

при $\bar{f} = \text{var}$:

I – VI – схемы соответственно при $\bar{f} = 0; 0,14; 0,25; 0,28; 0,75; 1,00$

Для всех вариантных схем воздухораспределения справедливо равенство:

$$\sigma_{\Delta t} = bQ / (0,24G^r), \quad (3)$$

где b , r – опытные коэффициенты, численные значения которых для вариантных схем «отделки» приведены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Коэффициент	Значения опытных коэффициентов для схем					
	I	II	III	IV	V	VI
a	0,44	0,43	0,33	0,34	0,31	0,35
c	0,22	0,18	0,19	0,21	0,21	0,21
m	1,05	1,28	1,42	1,26	1,00	1,08
n	0,18	0,25	0,05	0,23	0,10	0,20
b	0,39	0,33	0,19	0,21	0,29	0,24
r	0,77	0,69	0,77	0,76	0,76	0,61

Относительное среднеквадратичное отклонение – вентиляционный коэффициент вариации[1]:

$$\overline{\sigma_{\Delta t}} = \sigma_{\Delta t} / \Delta t_{шт}^{cp} = bG^{1-c-r} / a. \quad (4)$$

Графическая интерпретация этой зависимости для схем I–VI при переменной величине воздухообмена показана на рис. 4. Наряду с влиянием геометрического параметра отмечается возрастание $\overline{\sigma_{\Delta t}}$ с увеличением воздухообмена. Минимальное значение $\overline{\sigma_{\Delta t}}$ соответствует схеме III, максимальное – схеме I.

Таким образом, для вертикальной схемы воздухораспределения с «отделкой» наружных теплоотдающих ограждений горизонтальными брусками очевидно преимущество варианта III ($\bar{f}=0,25$) по $\overline{\sigma_{\Delta t}}$. Этот же вариант отличается лучшими показателями в сравнении с традиционной схемой воздухораспределения V ($\bar{f}=0,75$). Однако окончательное заключение о выборе оптимального решения может быть сделано с учетом связи

$$G = m_{\Delta t} Q K_K / (0,24 \Delta t_{шт}^H), \quad (5)$$

где $K_K = (1+x^* \overline{\sigma_{\Delta t}})$ – коэффициент компенсации воздухообмена [1]; $\Delta t_{шт}^H$ – нормативный перепад температур в штабеле продукции, °С.

С учетом $G \sim m_{\Delta t} K_K$ определена относительная величина воздухообмена для вариантных решений «отделки» (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Ва- риант	\bar{f}	$P(\Delta t_{шт} > \Delta t_{шт}^H)$	x^*	$m_{\Delta t}$	$\overline{\sigma_{\Delta t}}$	K_K	$m_{\Delta t} K_K$	$\bar{G} = G / G_{мин}$
I	0,00	0,1	1,03	0,49	0,41	1,42	0,696	1,77
II	0,14	0,1	0,78	0,45	0,36	1,28	0,576	1,46
III	0,25	0,1	0,90	0,32	0,26	1,23	0,394	1,00
IV	0,28	0,1	0,80	0,33	0,28	1,22	0,403	1,02
V	0,75	0,1	1,16	0,38	0,35	1,41	0,536	1,36
VI	1,00	0,1	1,07	0,36	0,32	1,31	0,482	1,22

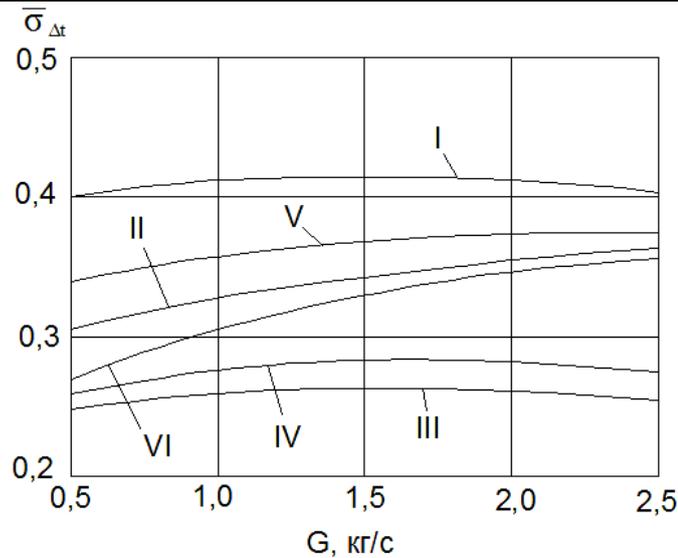


Рис.4. Зависимость вентиляционного коэффициента вариации от воздухообмена при $\bar{f} = \text{var}$:
I – VI – схемы соответственно при $\bar{f} = 0; 0,14; 0,25; 0,28; 0,75; 1,00$

Из табл. 2 следует, что в условиях сопоставимой эффективности, когда гарантируется температура в штабеле $t_{\text{шт}} \leq t_{\text{шт}}^{\text{н}}$ с вероятностью 90 % ($t_{\text{шт}}^{\text{н}}$ – нормативная температура), лучшие технико-экономические показатели имеют варианты III и IV. При этом вариант III дает 36 % экономии по воздухообмену в сравнении с традиционным вариантом V ($\bar{f} = 0,75$).

Таким образом, возможность обеспечения нормируемых параметров воздуха в слое хранимой скоропортящейся продукции с большой надежностью и при меньших эксплуатационных и капитальных затратах позволяет из всех исследованных вариантов вертикальной схемы воздухораспределения с конструктивно-технологическим оформлением термоизолирующих байпасов рекомендовать к проектированию и внедрению схему с вариантом «отделки» III.

Список литературы

1. Успенская, Л.Б. Математическая статистика в вентиляционной технике / Л.Б. Успенская. – М.: Стройиздат, 1980.
2. Баканова, С.В. Воздушное охлаждение в помещениях хранения скоропортящейся продукции / С. В. Баканова. – Пенза.: ПГУАС, 2012.

References

1. Uspenskaya, L.B. Mathematical Statistics in the ventilation technique / L.B. Uspenskaya. – M.: Stroiizdat, 1980.
2. Bakanova, S.V. Air cooling in rooms of storage of perishable production / S.V. Bakanova. – Penza: PGUAS, 2012.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 62:51-7

*Московский государственный
машиностроительный университет*

Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, 38,
тел.: 8 (495) 223-05-23

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры
«Информационные системы и
дистанционные технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

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

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

*Moscow State University of mechanical
engineering*

Russia, 107023, Moscow, 38,
Bolshay Semenovskaya St.,
tel.: 8 (495) 223-05-23

Budylina Evgeniya Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lector of the department
«Informational systems and distance
technology»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

Рассматриваются основные подходы к математическому описанию сложных систем различной природы для управления их качеством. Предлагаются возможности приложений.

Ключевые слова: сложные системы, моделирование, управление качеством.

MODELLING FROM THE VIEW OF CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

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

Main approaches to the mathematical description of complex systems of different nature to control their quality are considered.

Keywords: complex systems, modelling, control quality.

Точное математическое описание динамических процессов в объекте (независимо от природы) и их статики (периоды времени, когда производные по времени как зависимых, так и независимых переменных равны нулю), как правило, трудоемко, а часто и невозможно. Поэтому на практике обычно допускаются упрощения, исходя из предположения линейности объекта в области малых изменений величин, входящих в описание.

Аналитические методы математического описания позволяют создавать модели, качественно отражающие происходящие в объекте явления, но, как правило, *требуют экспериментальной проверки*. При использовании *активных методов* для целенаправленного изменения выходных величин в процессе эксперимента формируются специальные воздействия на объект. В *пассивных методах* применяется информация, полученная в процессе нормальной эксплуатации объекта (специальные воздействия не используются). Обычно применение чисто аналитических или пассивных экспериментальных методов позволяет получить зависимости (модели), в общих чертах правильно отражающие происходящие в объекте процессы. К сожалению, они не обладают требуемой точностью, что вызывает необходимость использования активных методов для определения или уточнения числовых значений коэффициентов в полученных зависимостях.

В основе анализа и синтеза систем лежат их динамические характеристики, описывающие поведение системы в целом либо отдельных ее элементов. Они обычно задаются в виде дифференциальных уравнений, кривых изменения выходных величин при возмущающем изменении входных, частотных характеристик и т.д. Как при экспериментальном, так и при аналитическом исследовании в большинстве случаев первоначально определяются динамические *характеристики отдельных элементов*; далее *по ним* находятся характеристики *целостной системы*. Возможен и другой подход, когда динамические характеристики *всей сложной системы* определяются сразу *экспериментально*. Его *преимущество* состоит в большей достоверности полученных характеристик, *недостаток* – в отсутствии данных о динамических характеристиках отдельных элементов. Что касается системы управления, то в большинстве случаев ее регулирующая часть исследуется поэлементно, а объект регулирования – в целом.

При любом методе экспериментального исследования системы с m входами и n выходами ее динамическая характеристика W_{ij} в *характеристической матрице*

$$\|W_{ij}\| = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1m} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2m} \\ & & \dots & \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nm} \end{bmatrix}$$

определяется в результате обработки записей $x_i(t), y_j(t)$ на протяжении одного и того же отрезка времени. Для исключения погрешностей, вносимых соседними входными величинами, во время эксперимента требуется стабилизировать эти величины около выбранных значений, а для проверки их стабильности производить непрерывную регистрацию. Необходимо стремиться, чтобы отклонения при испытаниях не превышали максимальных допустимых значений. Естественно, нельзя забывать, что используемый при испытаниях измерительный прибор не всегда является идеальным усилительным звеном, а чаще всего в нем присутствуют иные динамические свойства. Поэтому в ходе испытаний на конечном интервале времени будут зарегистрированы кривые $x_i^{(1)}(t), y_j^{(1)}(t)$, не совпадающие с кривыми изменения величин $x_i(t), y_j(t)$. На выходной сигнал накладывается шум как в самом объекте, так и в измерительных приборах. Исключить влияние динамических характеристик измерительных приборов достаточно сложно; поэтому приборы должны подбираться так, чтобы их инерцион-

ностью по сравнению с инерционностью объекта можно было пренебречь: в зоне пропускаемых объектом частот приборы должны быть по своим свойствам близки к усилительному звену ($x_i^{(1)}(t) = k_i^{(1)}x_i(t)$, $y_j^{(1)}(t) = k_j^{(1)}y_j(t)$; $k_i^{(1)}, k_j^{(1)}$ – масштабы записи). Желательно, чтобы шкалы приборов (по измерению входных и выходных величин) были равномерными.

Если объект хотя бы приближенно является линейным, то появляется возможность использования линейных математических моделей. В этом случае значения параметров модели должны выбираться так, чтобы, подавая на вход модели тот же входной сигнал, что и на вход объекта, можно было получить на выходе сигнал, как можно меньше отличающийся от того, который наблюдаем на выходе объекта. Отсюда следует, что модель не должна содержать источников шумов, не коррелированных соответствующими шумами объекта, так как при усреднении они только увеличат среднеквадратическое значение разности между выходными сигналами; подстройкой параметров можно получить наилучшую из возможных моделей. Однако и эта модель не будет *абсолютно* точной, так как *помехи и конечность времени наблюдения* сделают ее параметры до некоторой степени неопределенными. Это непосредственно следует и из *принципа* (закона) *100 %-й эффективности математики* [1]: «Для любой реальности (явления, процесса и т.д.) и любой наперед заданной (но не абсолютной) точности существует математическая структура, которая описывает эту реальность с этой точностью, и обратно, для любой математической структуры и любой точности существует реальность, которая описывается этой структурой с этой точностью». Для сложных систем *адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать*: модель может быть принята либо отвергнута на том основании, что получаемые с ее помощью оценки и выводы противоречат наблюдаемым фактам. *Системная модель всегда будет отличаться от оригинала; лишь при выполнении определенных условий можно говорить об асимптотическом приближении*. Адекватность достигается *сужением сферы использования* данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости (повышается за счет модельных экспериментов: появляются новые знания интуитивного характера, которые могут использоваться для настройки модели). Именно в процессе моделирования можно глубже проникнуть в существо объекта-оригинала, а модельные исследования приводят к открытию новых свойств и закономерностей функционирования изучаемой системы.

Всегда актуальны ответы на вопросы:

- каким должен быть период наблюдения для того, чтобы обеспечить заданную точность модели;
- насколько сложную и подробную модель можно построить, основываясь на данном объеме экспериментальной информации;
- при каких входных сигналах достигается наименьшая неопределенность в полученных значениях параметров.

К сожалению, трудно ожидать однозначности ответов (интуиция на грани искусства).

Что касается природы входного сигнала, то, если он записан и полностью известен, не играет роли, генерируется он детерминированным или случайным источником. Если на входе объекта сигналы являются случайными, то необходимо знать статистические характеристики источника этих сигналов (отдельные реализации, как правило, не требуются). *Мерой неопределенности* значений параметров a_i являются среднеквадратические значения дисперсии

$$\overline{da_i^2} = \frac{2\pi}{T} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega S_{xx}(\omega) S_{mm}(\omega) \left[\left(\frac{\partial W(j\omega)}{\partial a_i} \right)_{a_{i0}} \right]^2}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} d\omega S_{xx}(\omega) \left| \left(\frac{\partial W(j\omega)}{\partial a_i} \right) \right|^2 \right]^2}.$$

Здесь T – время наблюдения; $x(t)$ – входной сигнал объекта (модели); $y(t)$, $n(t)$ – неслучайная и случайная составляющие выходного сигнала объекта соответственно; $q(t)$ – выходной сигнал модели при входном сигнале $x(t)$; $l(t) = (y(t) + n(t)) - q(t)$ – разность между выходными сигналами объекта и модели; a_i – параметр передаточной функции модели $W(j\omega)$; S_{xx} , S_{nn} – спектральные плотности $x(t)$ и $n(t)$ соответственно; a_{i0} – значения параметров $W(j\omega)$, при которых модель и объект оказываются идентичными; $da_i = a_i - a_{i0}$ – отклонения параметров; $\overline{da_i^2}$ – среднеквадратические значения дисперсии параметра.

Как видим, при определении неизвестного параметра входной сигнал должен быть мощным и, по возможности, лежать в частотном диапазоне, определяемом функцией влияния параметра; выходной шум должен быть слабым и находиться вне этого диапазона. Время наблюдения T должно быть большим, так как неопределенность обратно пропорциональна \sqrt{T} .

В большинстве практических случаев моделирование требует использования *пошаговой корректировки исходной модели* (гомеостатическая концепция моделирования систем) за счет включения в модель программных механизмов адаптации и интерпретации, а также организации эффективного диалога с исследователем. Налицо циклический обучающий процесс: нулевое приближение – *каркас модели*; первое приближение с использованием *модельного эксперимента*; второе приближение на основе корректировки первого и т.д.

Для оценки эффективности и надежности модели всегда необходимо использовать *количественные критерии*. На основе *качественных критериев* модель можно оценить только лишь с точки зрения ее понятности, простоты, тестируемости, возможности развития, а также применения в других проблемных областях (на ранних стадиях когнитивного моделирования слабоструктурированных систем). Промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают критерии с балльными шкалами. Утверждение о значениях критериев с заданными типами шкал считается адекватным, если его истинность сохраняется после любых допустимых преобразований, определяемых типами шкал. Так что при анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации следует применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций. Никогда нельзя забывать о необходимости минимизации размерности критериального пространства.

При получении многофакторной математической модели из значительного числа факторов, влияющих на моделируемые критерии качества, выбираются лишь статистически значимые (определяются на основании отсеивающего эксперимента). Определяющим для получения качественных моделей является описание различных взаимодействий факторов, *создающих системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества*.

Многочисленные приложения приведенного подхода при моделировании технических систем различной природы с позиций управления их качеством приводятся в [2...5].

Список литературы

1. Бутковский, А.Г. К философии и методологии проблем управления / А.Г. Бутковский // Идентификация систем и задачи управления SICPRO` 03: Пленарные доклады II Международной конференции (Москва, 29-31 января 2003) / ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова. – М., 2003.

2. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.

3. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Э.В. Лапшин, Н.К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1(9). – С.3–11.

4. Оптимизация систем со сложной иерархией / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №2 (31). – С.324–328.

5. Данилов, А.М. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / А.М. Данилов, Э.Р. Домке, И.А. Гарькина // Информационные системы и технологии. – 2012. – №2 (70). – С.5–11.

References

1. Butkovskii, A.G. The philosophy and methodology of control / A.G. Butkovskii // System Identification and Control Problems SICPRO '03: Plenary Session II of the International Conference (Moscow, January 29-31, 2003) / Institute of Control Sciences them V.A. Trapeznikov. – М., 2003.

2. Systems analysis in building materials: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – М.: Moscow State University of Civil Engineering: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.

3. System methodology, identification systems and control theory: industrial and aerospace applications / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Lapshin, N.K. Yurkov // News of higher educational institutions. Volga region. Engineering. – 2009. – № 1 (9). – P.3–11.

4. Optimization of systems with complex hierarchy / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Journal of Civil Engineers. – 2012. – № 2 (31). – P.324–328.

5. Danilov, A.M. Estimates of the formalization of the characteristics of the control object / A.M. Danilov, E.R. Domke, I.A. Garkina // Information Systems and Technology. – 2012. – № 2 (70). – P.5–11.

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

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

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

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

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

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

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ПОЗИЦИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

А.М. Данилов, И.А. Гарькина

Рассматриваются вопросы повышения эффективности образовательной системы с позиций идентификации и управления сложными системами.

Ключевые слова: организационные системы, система образования, моделирование, управление.

EDUCATIONAL SYSTEM FROM THE VIEW POINT OF IDENTIFICATION AND MANAGEMENT

A.M. Danilov, I.A. Garkina

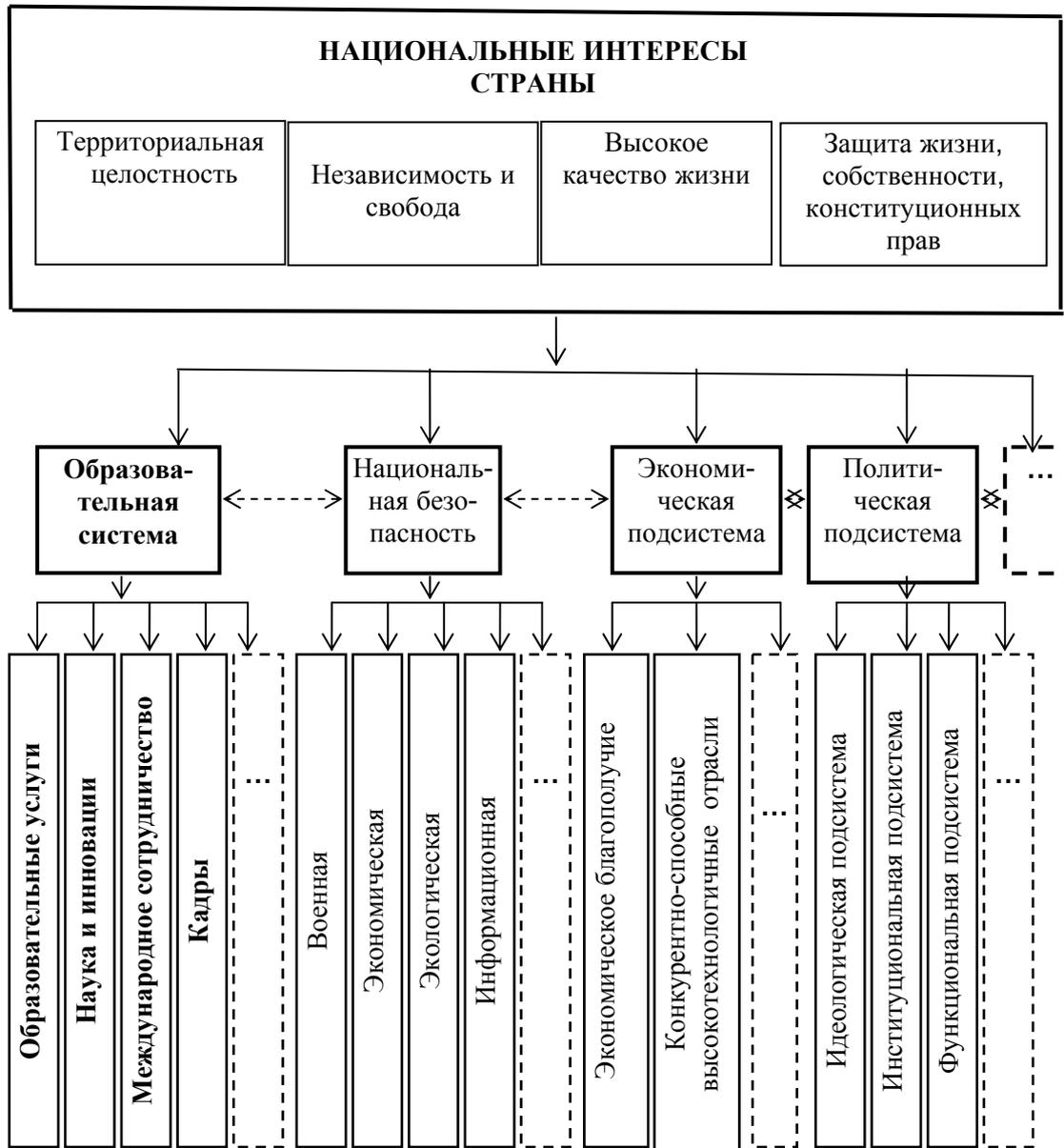
The problems of educational system efficiency increase in terms of identification and control of complex systems are considered.

Keywords: organizational system, education system, modeling, management.

Управление образовательной системой (ОС) должно осуществляться с использованием системного подхода, который является основой формирования нового типа мышления – системного, определяющего содержание, формы и методы обучения; знания, подлежащие усвоению, рассматриваются в единстве с формирующей их деятельностью. С точки зрения системного анализа ОС является подсистемой надсистемы «Национальные интересы страны» (см. рисунок). Задачи образовательной системы вытекают из задач надсистемы. Качество ОС оценивается по векторному критерию (иерархическая структура критериев качества): образовательная система должна обеспечить реализацию программ, определяемых надсистемой. Лишь в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными рациональными комплексами решаемых задач далее должна строиться иерархия образовательной системы с оценками ее элементов. Она и должна служить основой перспективного развития всей системы и отдельных ее подсистем. Подсистемы ОС должны обеспечить реализацию требований программ, определенных надсистемой, и реагировать на все изменения, происходящие при исполнении программы.

Укажем две основополагающие предпосылки при разработке образовательной системы. Прежде всего, качество образования определяется наличием потребителя во внешней среде (надсистема); особенно четко это указывается в [1]: «...когда внешней средой наука не востребована, то по этому свойству система изолирована или закрыта, и только тогда, когда появится потребитель во внешней среде, система от-

кроется». Вторую сформулировал академик В.И.Арнольд: *без экономики нет науки, без науки нет экономики; задача государства – разорвать этот порочный круг.* Многие беды в системе образования и не только в России связаны с недопониманием именно этих предпосылок.



Образовательная система в надсистеме

Как и для большинства сложных систем, многие задачи по разработке и функционированию образовательной системы, в том числе задачи по моделированию и управлению, нельзя решить на основе формальных методов. Это связано с существенной и сложной динамикой, непрозрачностью экономических и административных отношений. В преобладающем большинстве случаев основными являются экспертная информация и методы коллективной многовариантной экспертизы.

С точки зрения управления наиболее важными свойствами ОС как организационной системы являются самоорганизация, нестационарность, неопределенность. При идентификации, синтезе, управлении надо исходить из реально сложившихся, а не нормативных организационных структур, процедур функционирования, методов стимулирования и т.д. Решение этих задач невозможно в рамках какой-либо одной, даже очень сложной модели; нужна система моделей по системообразующим классам (учитываются вертикальные и горизонтальные связи).

В условиях реформы высшего образования основным является сохранение доверия к качеству образования. Оно определяется качественным составом преподавателей, информационной базой, нормативным материально-техническим обеспечением образовательного процесса, его лабораторной базой, традиционными формами общения преподавателя и обучающегося, включая контроль преподавателя за деятельностью обучающегося при обратной связи, позволяющей достичь понимания учебного материала и вовремя скорректировать образовательный процесс.

Новые технологии обучения должны предусматривать сохранение основных составных компонент традиционного обучения, которые и вызывали к нему доверие. Многие из старых методов обучения оказались малоэффективными (общеизвестен факт низкого качества знаний в условиях важного для малых городов дистанционного обучения; до конца не ясна роль тестов, письменных экзаменов без диалога обучающихся с преподавателем в повышении качества образования). Пока модернизация системы образования разворачивается при сложных, порой противоречивых условиях:

- делегирование функций федерального уровня на региональные с опорой на местное самоуправление (перекладывание стратегических функций и проблем государства на учебные заведения);
- приведение в соответствие номенклатуры и мощности сети учреждений образования с потребностями региона с учетом государственной политики в сфере образования (формирование региональных замкнутых рынков труда и образовательных услуг, усиление разрыва между столичным и провинциальным образованием, потеря системности федерального образования);
- разработка нормативно-правовой базы для региональных органов управления (недостаточная оперативность разработки на федеральном уровне);
- обновление содержания образования, технологии обучения, нормативно-правового, научно-методического обеспечения образования (возрастание требований к кадровому, материально-техническому, информационному обеспечению учебно-воспитательного процесса должно сопровождаться увеличением финансирования);
- упадок системы повышения квалификации профессорско-преподавательского состава;
- отток квалифицированных кадров из образования в другие отрасли экономики с более высоким уровнем заработной платы, других жизненных благ и льгот;
- вхождение российского образования в мировое образовательное сообщество;
- формирование конкурентной среды в лице государственных и негосударственных образовательных учреждений (внедрение платных образовательных услуг способствует превращению образования из массового в элитарное).

В этих условиях региональные вузы должны стать центрами организации дополнительного образования с учетом структуры региональных рынков труда. Должны соблюдаться принципы усиления межпредметных связей; логических взаимосвязей между отдельными дисциплинами в информационном пространстве; модульности.

На смену узкому информационному подходу традиционного образования приходит более широкий стратегический подход – личностно-ориентированный. Образование преследует цель подготовки специалиста, готового к исследовательской, проектной, организационной, предпринимательской деятельности, и должно сопровождаться личностно-развивающим подходом; предполагается целенаправленная работа по формированию готовности студента к самообразованию.

Начальным этапом и методологической базой идентификации механизма управления (группа непротиворечивых способов управления) в целом и отдельных его компонентов является построение *концептуальных моделей*.

В условиях рыночных отношений необходима четкая государственная политика в сфере образования, не только отражающая, но и опережающая уровень развития общества, с подготовкой возможности восприятия новых идей. Все это предъявляет повышенные требования к широкому использованию интенсивных форм развития высшей школы для повышения качества образования и образовательных услуг. Налицо процесс коммерциализации вузов при возрастающих требованиях к качеству специалистов при их быстрой профессиональной адаптации (переход от государственного планирования подготовки и распределения специалистов к договорным отношениям с будущими потребителями).

Несмотря на существование разных подходов к обеспечению оптимального управления образовательной системой с использованием моделирования и компьютерных технологий, все они, так или иначе, ориентированы на решение основных задач:

- разработку иерархической структуры критериев качества и соответствующей ей иерархической структуры образовательной системы (как организационной),
- формулировку и решение многокритериальной задачи управления образовательной системой в условиях коммерциализации высшей школы (использование методов системного анализа, в частности модификаций метода ПАТТЕРН, а также итеративных процедур на основе существующего опыта проектирования и функционирования ряда сложных систем);
 - оптимизацию подсистем, в том числе системы управления учебным процессом;
 - реализацию системы менеджмента качества образования, исходя из удовлетворения образовательных услуг требованиям потребителя;
 - обеспечение соответствия государственным образовательным стандартам, законодательству по конкурентоспособным ценам с получением прибыли для развития собственно образовательной системы (в ряде вузов осуществлена адаптация системы менеджмента качества по МС ИСО-9000).

Вопросы построения моделей подсистем и образовательной системы в целом рассматривались в многочисленных публикациях [2] и обсуждались на международных форумах по проблемам науки, техники и образования, в том числе проведенных под эгидой UNESCO. Большое внимание им уделяется и в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства (разработан пакет документов для системы менеджмента качества образования, в том числе по балльно-модульно-рейтинговой системе оценки качества освоения студентами основных образовательных программ по государственным образовательным стандартам третьего поколения).

Выводы:

1. Основополагающими предпосылками при разработке образовательной системы являются наличие потребителя и учет непосредственной связи между экономикой, наукой и образованием.
2. Задачи и иерархическая структура критериев качества образовательной системы определяются надсистемой «Национальные интересы страны».
3. Образовательная система и ее иерархическая структура направлены на реализацию программ надсистемы и определяются иерархической структурой критериев качества.
4. Подсистемы образовательной системы должны обеспечить реализацию требований программ, определенных надсистемой, и реагировать на все изменения, происходящие при исполнении программы.
5. Основными свойствами образовательной системы являются самоорганизация, нестационарность, неопределенность. При идентификации, синтезе и управлении должны учитываться реально сложившиеся составляющие системы, а не нормативные.
6. Эффективность использования формальных методов идентификации, синтеза и управления ОС ограничивается её существенной и сложной динамикой, непрозрачностью экономических и административных отношений. В большинстве случаев основными являются экспертная информация и методы коллективной многовариантной экспертизы.
7. Идентификация, синтез и управление в рамках какой-либо одной, даже очень сложной модели невозможны; требуется система моделей по системообразующим классам.
8. При многокритериальной оптимизации образовательной системы должно предусматриваться использование итеративного способа.

Список литературы

1. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
2. Гарькина, И.А. Системные методологии в управлении качеством образования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Педагогика высшей школы и профессионального образования. – 2012. – №1. – С.7–9.

References

1. The systems approach and system-wide patterns / I.V.Prangishvili. – М.: SINTEG, 2000. – 528 p.
2. Garkina, I.A. Sistemnyye methodology in the management of the quality of education / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Pedagogy of higher education and vocational education. – 2012. – № 1. – P.7–9.

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

Хрусталеv Борис Борисович,
доктор экономических наук, профессор,
зав. кафедрой «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: hrustalev_bb@mail.ru

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Стандартизация,
сертификация и аудит качества»
E-mail: loganin@mai.ru

Учаева Татьяна Владимировна,
аспирант кафедры «Стандартизация,
сертификация и аудит качества»

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

Khrustalev Boris Borisovich,
Doctor of Economic Sciences, Professor,
Head of the Department «Economics,
Organization and Management»
E-mail: hrustalev_bb@mail.ru

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Standardization, certification and
quality audit»
E-mail: loganin@mai.ru

Uchaeva Tatiana Vladimirovna,
Postgraduate of the department
«Standardization, Certification and Quality
Auditing»

ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ МАРКЕТИНГА

Б.Б. Хрусталеv, В.И. Логанина, Т.В. Учаева

Предложены варианты развития предприятий промышленности строительных материалов. Разработана система показателей, характеризующих продукцию, потенциал конкурентоспособности предприятия, условия его функционирования и инвестиционной привлекательности, а также эффективность функционирования.

Ключевые слова: эффективность работы предприятий, потенциал конкурентоспособности, направление развития, местная минерально-сырьевая база.

ASSESSMENT PARAMETERS OF CONSTRUCTION INDUSTRY ENTERPRISES BASED ON MARKETING

B.B. Khrustalev, V.I. Loganina, T.V. Uchaeva

The variants of the development of enterprises of construction materials are proposed. A system of indicators characterising the product, the potential competitiveness of the company, the conditions of its operation investment climate, and the efficiency of operation are worked out.

Keywords: enterprise performance, competitive potential, direction of development, local mineral resources.

Любое предприятие обладает определенным потенциалом, который использует в процессе своей деятельности. При этом предприятие стремится минимизировать затраты, максимизировать полученные результаты (объем продукции, прибыль) при максимально коротких сроках их получения (изготовления). Фирма, как правило, представляет собой открытую систему и подвержена влиянию внешней среды, которое является зачастую негативным. Это не позволяет фирме в полной мере реализовать свой потенциал и достичь желаемого результата. Снизить негативное влияние внешних условий или минимизировать его целесообразно на основе стратегического планирования и управления на предприятиях, формирования гибких организационных

структур, осуществления маркетинговой деятельности, управления рисками на предприятии, максимального использования потенциала предприятий регионального инвестиционно-строительного комплекса (ИСК).

При этом особое внимание уделяется вопросам развития службы маркетинга на предприятиях инвестиционно-строительного комплекса в целом по всем направлениям для создания нормальных условий использования рациональных форм организации и управления за счет проведения маркетинговых исследований, направленных на:

- создание новой конечной продукции (PRODUCT);
- создание системы новых потребителей конечной продукции и инвесторов как внутри инвестиционно-строительного комплекса, так и за его пределами (CONSUMER);
- создание системы постоянных надежных поставщиков сырья, полуфабрикатов как внутри инвестиционно-строительного комплекса, так и за его пределами (SUPPLIER);
- проведение новой ценовой политики предприятиями при создании новой конечной продукции (PRICE);
- определение рациональных мест расположения производственных и социальных баз и рассредоточенных объектов строительства в пределах инвестиционно-строительного комплекса и за его пределами (PLACE);
- определение суммарных затрат (инвестиций), связанных с развитием производственных процессов при возведении объектов строительства и реализации их на рынке жилья (PROJECT);
- создание системы подготовки высококвалифицированных кадров, служб в фирмах, компаниях для выполнения сложных видов работ в различных условиях организационно-экономических ситуаций (PERSONNEL);
- создание необходимых организационно-экономических и инвестиционных условий для максимального использования потенциала предприятий в пределах Пензенского инвестиционно-строительного комплекса и за его пределами (POTENTIAL);
- рациональное развитие всех видов производственных процессов при возведении рассредоточенных объектов строительства и реализации конечной продукции в течение всех периодов развития инвестиционно-строительного комплекса (PROCESS);
- создание необходимых условий для выхода на новые рынки жилья и районы деятельности (REGION).

Для успешного функционирования предприятий инвестиционно-строительного комплекса отделы маркетинга на предприятиях должны выполнять следующие функциональные задачи: анализ положения предприятия на рынке, его финансово-хозяйственной деятельности; анализ внешних и внутренних проблем предприятия; переход от реактивной формы управления (реакция на текущие проблемы) к управлению на основе прогнозов и анализа; выработка стратегии развития предприятия; контроль за результатами сделок; постепенный отказ от деловых отношений с партнерами, использующими неденежные формы расчетов; осуществление контроля за бартерными операциями; прогноз развития рынка; проведение маркетинговых исследований; анализ сильных и слабых сторон предприятия относительно своих конкурентов; проведение анализа сети сбыта (создание сбытовой сети при её отсутствии), повышение личной заинтересованности работников, отвечающих за сбыт продукции; изучение потребителей: изучение уровня платёжеспособного спроса, прямые связи с потребителями, приведение качества продукции в соответствие с запросами потребителей, использование стимулирующей ценовой политики по отношению к потребителям; анализ системы снабжения: выявление эффективных поставщиков; исследовательская деятельность: «ноу-хау»; создание имиджа предприятия: внешний облик предприятия; косметический ремонт рабочих помещений; оформление рекреаций; внешний облик работников предприятия; рекламная деятельность.

Возможно несколько вариантов по обеспечению процесса, направленного на более интенсивное вовлечение минерально-сырьевых и всех других ресурсов в экономику региона.

При этом необходимо обратить внимание на существующие центры переработки минеральных ресурсов в регионе. Как видно из рис. 1, эти центры образуют неравномерную концентрацию в регионе, оторваны от сырья, что определяет необходимость формирования рациональных параметров деятельности промышленных предприятий строительных материалов на основе маркетинга и выделения различных зон деятельности предприятий (рис.1).

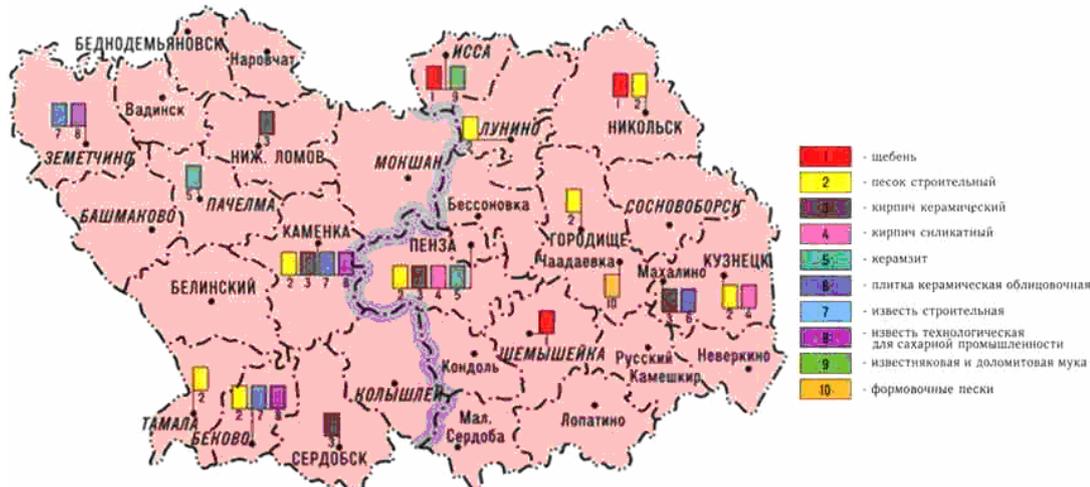


Рис.1. Основные центры переработки минерального сырья

В Пензенской области существует возможность развития регионального инвестиционно-строительного комплекса по основным направлениям использования минерально-сырьевых ресурсов (песок, известь, диатомит и т.д.), которые могут быть использованы не только в рамках строительного комплекса, но и во всех других смежных отраслях как в пределах одного региона, так и в других регионах.

Формирование рациональных параметров деятельности промышленных предприятий строительных материалов на основе маркетинга может осуществляться следующим образом.

На рис. 2 представлена модель горизонтального и вертикального развития региональной экономической системы в условиях повышенного риска.

Первое направление – это формирование рациональных параметров деятельности промышленных предприятий строительных материалов на основе маркетинга и зон их деятельности с привязкой их к трудовым ресурсам и потребителю конечной продукции с целью снижения рисков, связанных с трудовыми, финансовыми, информационными ресурсами, но с одновременным повышением рисков по привлечению материальных ресурсов, транспортными издержками и т.д. (рис.2,б).

Второе направление – это формирование рациональных параметров деятельности промышленных предприятий строительных материалов на основе маркетинга и зон их деятельности с привязкой их к материальным ресурсам с целью снижения рисков, связанных с их использованием, но с одновременным повышением рисков по привлечению всех остальных ресурсов (рис.2,в).

Третье направление учитывает два предыдущих направления в рациональном сочетании их между собой (рис.2,г).

При этом формируются различные основные ситуации, которые можно разделить на: производственные, организационно-управленческие, экономические, что определяет понятие «инвестиционная привлекательность» на каждом уровне управления для потенциального инвестора в регионе (производственный, отраслевой и территориальный).

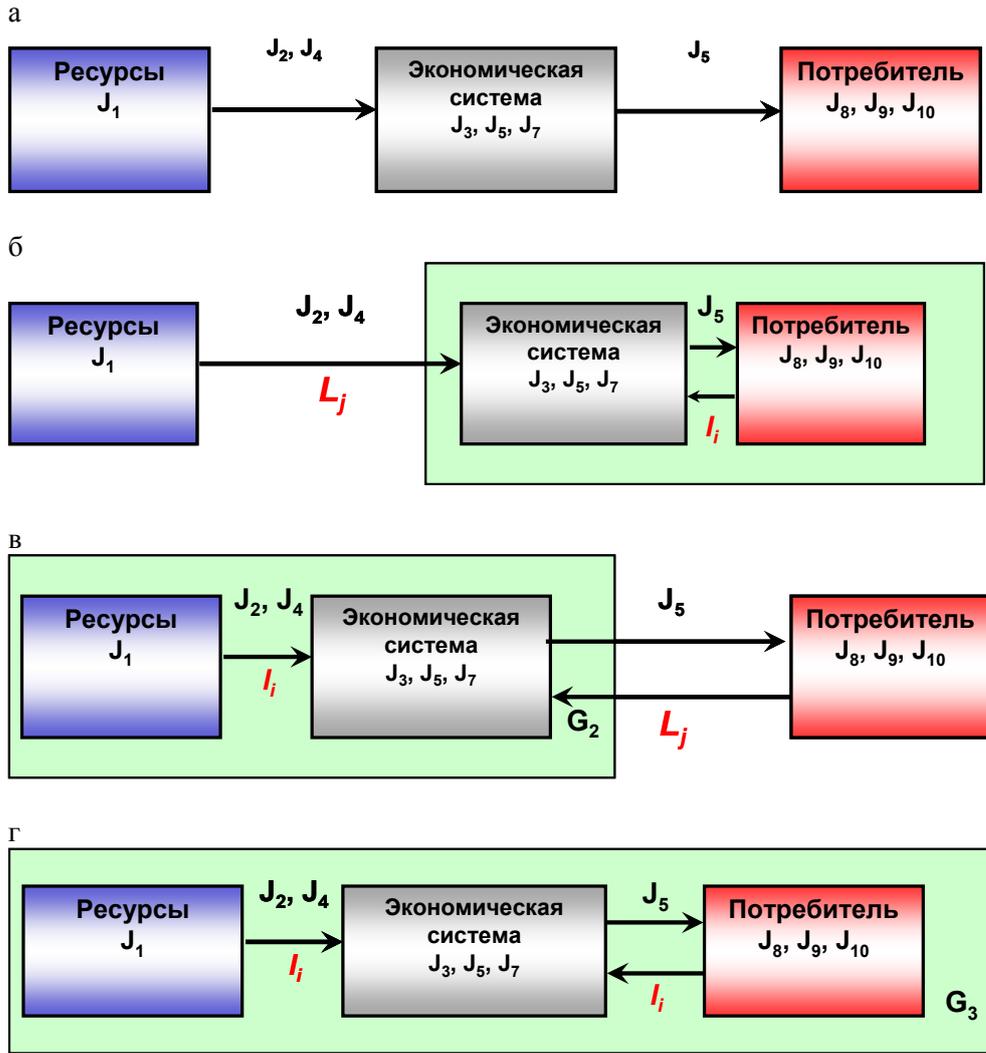


Рис.2. Варианты формирования эффективных зон деятельности промышленных предприятий строительных материалов на основе маркетинга

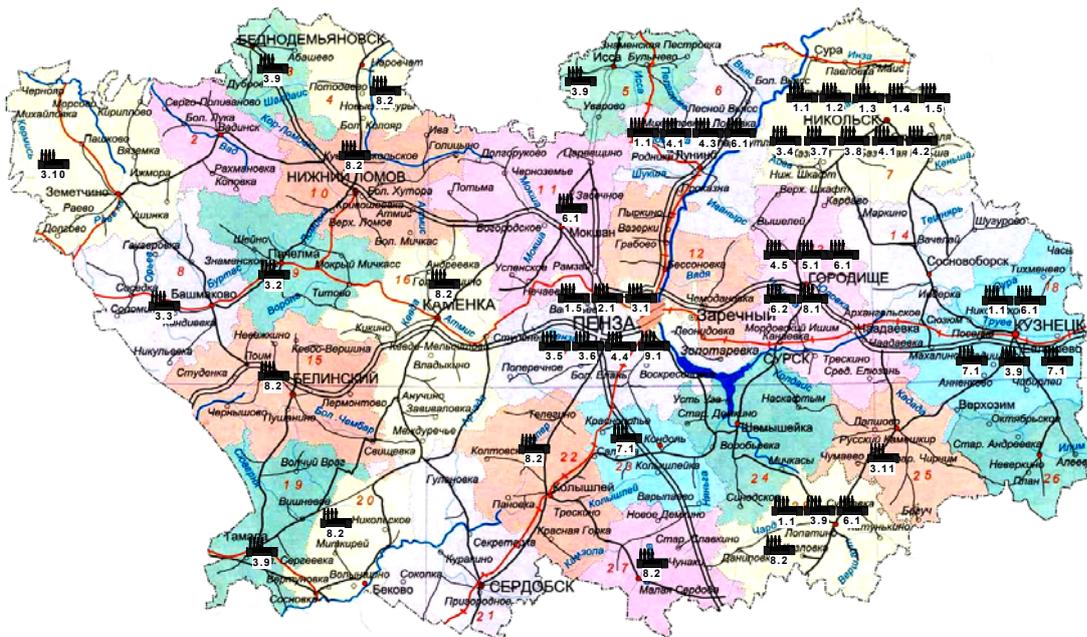


Рис. 3. Размещение предприятий промышленности строительных материалов Пензенской области

Ситуацию развития предприятия по выпуску строительной продукции \mathcal{E}_c можно представить как функцию f нескольких параметров (блоков), взаимосвязь которых обеспечивает определение таких важных для организации показателей, как себестоимость, прибыль и т.д.:

$$\mathcal{E}_c = f(A_1, A_2, A_3, A_4, \mathcal{E}_\phi), \quad (1)$$

где A_1 – характеристика строительной продукции предприятия; A_2 – характеристика потенциала конкурентоспособности предприятия; A_3 – характеристика условий функционирования предприятия; A_4 – характеристика инвестиционной привлекательности предприятия; \mathcal{E}_ϕ – эффективность функционирования предприятия.

Эффективность работы предприятий промышленности строительных материалов основывается на выборе наиболее рациональных вариантов организации их деятельности, т.е. проблема сводится к тому, что предприятие, постоянно реагируя на изменения во внешней среде, старается стабилизировать свою внутреннюю структуру за счет поэтапного изменения основных интегральных блоков параметров (A_1, A_2, A_3, A_4).

Такой подход позволяет в одной общей системе рассмотреть большой круг вопросов и задач по различным сферам деятельности предприятий и сформировать основные направления повышения эффективности их работы в современных условиях и влияния рыночной экономики [1].

В настоящее время предприятия промышленности строительных материалов Пензенского региона построены по первому направлению, что приводит к увеличению импорта строительных материалов из других регионов, стагнации местной промышленности строительных материалов и удорожанию жилья для конечных потребителей.

Так, например, изменив условия функционирования предприятия в результате размещения его вблизи расположения минерально-сырьевых ресурсов, можно оптимизировать основные логистические схемы обеспечения производственных процессов материальными ресурсами и обеспечить надежность и ритмичность поставки материальных ресурсов (блок A_2).

Развитие именно второго направления является одним из факторов снижения стоимости и повышения конкурентоспособности продукции промышленности строительных материалов [2, 3].

Анализ минерально-сырьевых ресурсов Пензенской области свидетельствует, что основные строительные материалы, которые могут быть изготовлены на сырье Пензенской области и широко использоваться в строительной практике, следующие:

- портландцемент (Никольский район);
- строительная известь (Никольский район);
- сухие строительные смеси;
- силикатный кирпич (г.Пенза);
- керамический кирпич, блоки и черепица;
- газосиликат;
- газобетон, пенобетон;
- листовое оконное флоат-стекло (Городищенский район);
- древесно-стружечные плиты (Городищенский район);
- минеральные пигменты и краски на их основе;
- высокотемпературная теплоизоляция на базе опок, трепела (Никольский район);
- жидкое стекло на базе диатомитов и трепелов (Никольский район);
- активные минеральные добавки из трепелов и диатомитов (Никольский район);
- заполнители для бетона М 100-200 из песчаников и каменной муки из отсевов камнедробления песчаников и доломитизированных известняков (п. Исса).

Размещение предприятий промышленности строительных материалов Пензенской области представлено на рис. 3.

Примерный баланс потребности в основных строительных материалах по Пензенской области с 2013 до 2015 г. приведен в таблице с учетом стабилизации мощностей промышленности строительных материалов в рассматриваемый период.

Примерный баланс потребности в основных строительных материалах
по Пензенской области с 2010 до 2015 гг.

№ п/п	Наименование материалов	2013 г.	2014 г.	2015 г.
1	Цемент, т	32984	32984	32984
2	Известь строительная, т	16492	16492	16492
3	Пеногазобетон, м ³	706800	706800	706800
4	Кирпич керамический и силикатный, тыс. шт.	471200	471200	471200
5	Песок кварцевый, т	67146	67146	67146
6	Бетон и ж/б, м ³	824600	824600	824600
7	Сталь, т	128402	128402	128402
8	Материалы на основе древесины	58900	58900	58900
9	Стекло оконное, м ²	235600	235600	235600
10	Линолеум, м ²	1060200	1060200	1060200
11	Лакокрасочные материалы, т	1178	1178	1178

Таким образом, на территории Пензенской области необходимо строительство предприятий, ориентированных на использование местных сырьевых ресурсов. Это будет способствовать снижению стоимости продукции и повышению конкурентоспособности предприятия, обеспечению рабочими местами, снижению социальной напряженности в регионе и решению жилищной проблемы в области.

Список литературы

1. Хрусталеv, Б.Б. Формирование организационно-экономического механизма управления потенциалом конкурентоспособности предприятий промышленности строительных материалов / Б.Б. Хрусталеv, В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С.142–145.
2. Логанина, В.И. Применение минерально-сырьевых ресурсов Пензенского региона для изготовления сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Э.Р. Акжигитова // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. – 2013. – №2. – С.34–37.
3. Перспективы изготовления органоминеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Т.Н. Дмитриева, В.Н. Горбунов // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 9. – С.36–40.

References

1. Hrustalev, B.B. Organizational economic management mechanism of building materials companies competitive potential / B.B. Hrustalev, V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Regional Architecture and engineering. – 2013 – № 1. – P. 142–145.
2. Loganina, V.I. The use of mineral resources of the Penza region for dry mortar / V.I. Loganina, E.R. Akzhigitova // Bulletin BSTU nam. V.G. Shuhova. – 2013. – № 2. – P.34–37.
3. Prospects for the manufacture of organic-based additives Patriotic quality raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhov, T.N. Dmitriev, V.N. Gorbunov // Trans. Construction. – 2009. – № 9. – P.36–40.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Хрусталеv Борис Борисович,
доктор экономических наук, профессор,
зав.кафедрой «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: hrustalev_bb@mail.ru

Ганиеv Марат Галемдянович,
аспирант кафедры «Экономика,
организация и управление производством»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Khrustalev Boris Borisovich,
Doctor of Economic Sciences,
Head of the department «Economics,
organization and management of production»
E-mail: hrustalev_bb@mail.ru

Ganiev Marat Galemlyanovich,
Postgraduate of the department «Economics,
organization and management of production»

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СФЕРЫ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАРКЕТИНГОВОГО ПОДХОДА

Б.Б. Хрусталеv, М.Г. Ганиеv

Предложен механизм формирования стратегии развития предприятий сферы жилищно-коммунального хозяйства, основанный на использовании маркетинговых исследований и подходов с учетом особенностей их функционирования и возможностей взаимointegrации функциональных блоков сферы. Рассмотрены варианты стратегического развития в наиболее распространённых ситуациях формирования и развития сферы ЖКХ в Российской Федерации.

Ключевые слова: маркетинговый подход, жилищно-коммунальное хозяйство, стратегия развития, стратегическое развитие сферы жилищно-коммунального хозяйства.

FORMATION OF ENTERPRISE DEVELOPMENT STRATEGY IN SPHERE OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES BASED ON USE OF MARKETING APPROACH

B.B. Khrustalev, M.G. Ganiev

The article presents the mechanism of formation of enterprise development strategy sphere of housing and communal services based on the use of marketing research and approaches, taking into account their functioning and capabilities to the integration of the functional units of the sphere. There have been identified variants of the strategic development of the most common situations, the formation and development of the housing and utilities sector in the Russian Federation.

Keywords: marketing approach, housing and communal services, strategy development, strategic development sphere of housing and communal services.

Проведенные маркетинговые исследования показали, что современное состояние сферы жилищно-коммунального хозяйства характеризуется крайне низкой эффективностью функционирования всех ее составных элементов, высокими барьерами, низкой управляемостью, инновационно-инвестиционной привлекательностью, и, как следствие, низким качеством жилищно-коммунальных услуг. Основными приоритетами при разработке стратегии развития с использованием маркетинговых подходов

являются развитие потенциала сферы жилищно-коммунального хозяйства, устранение влияния негативных факторов и повышение эффективности ее функционирования.

Проведенные маркетинговые исследования рынка жилья позволили установить, что большинство предприятий сферы ЖКХ находится и функционирует в зонах неэффективной деятельности, а общее состояние сферы можно охарактеризовать как кризисное, при этом у нее достаточно возможностей для улучшения возникшей ситуации.

Функционально сферу ЖКХ можно разделить на четыре крупных блока:[2]

- коммунальный комплекс – совокупность предприятий, оказывающих коммунальные услуги населению;
- жилищный комплекс – совокупность предприятий, оказывающих жилищные услуги населению, включая услуги по уборке территории и мест общего пользования, вывозу мусора, капитальному и текущему ремонту и т.д.;
- управление – совокупность предприятий, осуществляющих управление жилым фондом и взаимодействие между функциональными блоками сферы;
- рынок – совокупность всех потребителей жилищно-коммунальных услуг, включая жильцов, не являющихся собственниками жилья (члены семьи собственника, арендаторы и т.д.).

При этом, как показали проведенные маркетинговые исследования, особенности сферы ЖКХ допускают взаимоинтеграцию функциональных блоков. В различных условиях функционирования возможно 8 различных вариантов взаимоинтеграции (рис. 1), каждый из которых имеет свою рациональную область использования и будет предпочтителен в тех или иных условиях [3].

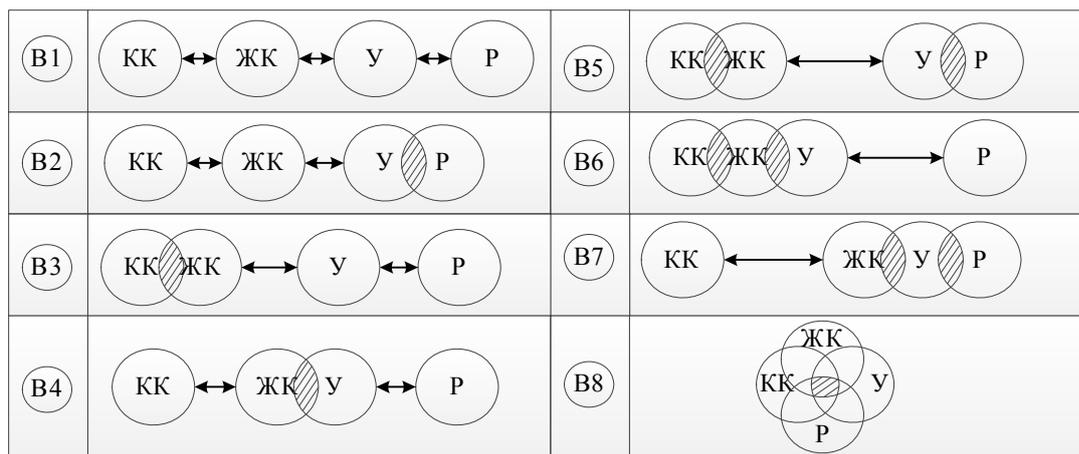


Рис. 1. Возможные варианты интеграции функциональных блоков жилищно-коммунальной сферы

Развитие предприятия может происходить по нескольким направлениям: вертикальное (переход на новые рынки), горизонтальное (улучшение продукта (услуги)), внутреннее (наращивание потенциала, совершенствование управленческих связей), диагональное (одновременное улучшение продукта (услуги) и переход на новые рынки за счет привлечения инвестиций). При стратегическом развитии предприятий сферы ЖКХ можно выделить четыре основных направления:

1. Инвестиционная стратегия – система взаимоувязанных мер по повышению инвестиционной привлекательности объекта и обеспечению притока инвестиций в необходимом объеме. Эта стратегия затрагивает все четыре функциональных блока сферы ЖКХ.

2. Инновационная стратегия – комплекс взаимоувязанных мер по повышению потенциала системы за счет разработки и внедрения инновационных технологий, направленных на повышение эффективности деятельности предприятия. Данная стратегия направлена на изменения в функциональных блоках сферы ЖКХ «Коммунальный комплекс» и «Жилищный комплекс».

3. Внутрифирменная стратегия – стратегия, направленная внутрь системы и включающая в себя подстратегии по каждой системе предприятия и ее составляющим с целью формирования более эффективной системы управления и взаимодействия различных участников сферы. В первую очередь данная стратегия направлена на преобразование в функциональном блоке «Управление» сферы ЖКХ.

4. Рыночная стратегия – стратегия взаимодействия предприятий сферы с рынком, направленная на выявление нужд потребителей, выход на новые рынки и укрепление своих позиций на рынке. Она наиболее трудна для реализации, поскольку сопряжена с большим количеством неизвестных в своем составе, но в современных экономических условиях ее реализация является жизненно необходимой. Данная стратегия направлена на преобразования в функциональных блоках «Управление» и «Рынок» сферы ЖКХ, но оказывает влияние на всю сферу в целом.

Дальнейший выбор наиболее рационального пути развития предприятия происходит исходя из сложившихся условий внешней и внутренней среды. Выбор варианта осуществляется путем сравнения альтернатив по интегральному значению эффективности, которое учитывает время реализации, стоимость, интегральный барьер реализации, интегральный показатель риска.

При стратегическом развитии предприятие, как система, в каждый момент времени находится в определенном состоянии. При переходе системы из одного состояния в другое предприятию необходимо потратить ряд ресурсов: время, капитал и т.д. При этом существуют барьеры, препятствующие осуществлению данного перехода. Оценив варианты переходов и выбрав те из них, для которых затраты ресурсов минимальны, а барьеры преодолимы (в соответствии с возможностями фирмы), мы получаем дискретное число вариантов стратегического развития (рис.2).

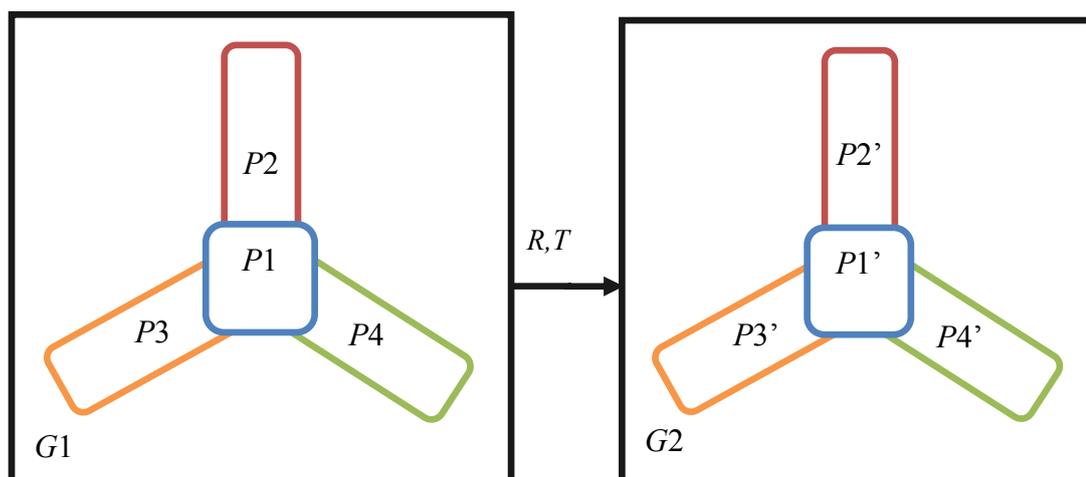


Рис. 2. Переход предприятия в новое состояние при стратегическом развитии:
 $G1$ – начальное положение предприятия; $G2$ – новое положение предприятия после изменений;
 $P1, P1'$ – блок показателей, характеризующих управление предприятием до и после изменений соответственно; $P2, P2'$ – блок показателей, характеризующих продукт выпускаемый предприятием до и после изменений соответственно; $P3, P3'$ – блок показателей, характеризующих потенциал предприятия до и после изменений соответственно;
 $P4, P4'$ – блок показателей, характеризующих положение предприятия на рынке до и после изменений соответственно; T – затраты времени на проведение соответствующих изменений;
 R – ресурсные затраты на проведение соответствующих изменений

На каждом этапе мы имеем возможность перехода из 7 различных состояний (3 горизонтальных (то есть осуществляемых на одном этапе развития (параллельно)) и 4 вертикальных (то есть на новом этапе развития (последовательно))).

Каждое состояние $G1$ характеризуется комплексом показателей, которые изменятся при осуществлении перехода. Таким образом, во-первых, данные показатели дают нам сведения о том, способна ли организация совершить данный переход (или требуются какие-либо предварительные действия), а во-вторых, сравнение системы

показателей состояния $G2$ выявит, целесообразен ли данный переход. Это дает возможность сравнить различные варианты развития предприятия не только на каждом этапе, но и эффективность всей цепочки этапов развития через интегративный показатель \mathcal{E}_c , рассчитываемый по формуле

$$\mathcal{E}_c = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt[4]{P_{1i} \cdot P_{2i} \cdot P_{3i} \cdot P_{4i}}}{\sqrt{R_i \cdot T_i}}, \quad (1)$$

где n – максимальное количество этапов реализации стратегии развития.

В конечном итоге мы получаем карту развития предприятия, дающую нам представление о том, какую стратегию следует применять на том или ином этапе (рис. 3).



Рис.3. Карта стратегического развития предприятия

На сегодняшний день можно выделить пять наиболее типичных ситуаций формирования и развития сферы жилищно-коммунального хозяйства:

1. *P1. Регионы с существующей многоэтажной застройкой с неоднородными потребителями, без возможности перестройки.* Этот вариант является наиболее распространенным в российских условиях и одним из самых проблемных, поскольку развитие сферы ЖКХ в этих условиях затруднено из-за большого количества сдерживающих факторов. В подобных условиях реализацию стратегии развития необходимо начинать с внутрифирменной стратегии (рис. 4).

Данный вариант развития является наиболее быстрым в реализации, характеризуется относительно низкими значениями показателей интегрального барьера, интегральных затрат и риска. В рамках реализации этой стратегии развития в регионе должен сформироваться вариант интеграции функциональных блоков сферы ЖКХ «В4».

2. *P2. Новый микрорайон с неоднородными потребителями.* При возведении новых микрорайонов возможно формирование более эффективных жилищно-коммунальных структур, с заложением потенциала для дальнейшего развития. В условиях постоянного роста городов это является одним из приоритетных направлений деятельности. Однако реализация подобных проектов ограничена низким потенциалом системы на начальных этапах.

На первом этапе происходит формирование и развитие рынка с последующим наращиванием потенциала системы и привлечением инвестиций для ее развития. На последнем этапе осуществляются развитие управляющих систем в сфере ЖКХ, их модернизация в соответствии с новыми условиями функционирования и внедренными инновационными технологиями. В рамках реализации данной стратегии развития необходимо формирование в сфере ЖКХ варианта интеграции функциональных блоков сферы «В7».

3. *P3. Новый микрорайон бизнес-класса с однородными потребителями.* Данный вариант довольно распространён во многих развитых странах. В России встречается в основном в крупных экономически развитых регионах, таких, как Москва и Санкт-Петербург. Такой вариант является наиболее привлекательным с точки зрения инвестиционных возможностей, поскольку изначально обладает весьма высоким потенциалом.

При реализации этого варианта стратегии необходимо формирование варианта интеграции функциональных блоков сферы ЖКХ «В7».

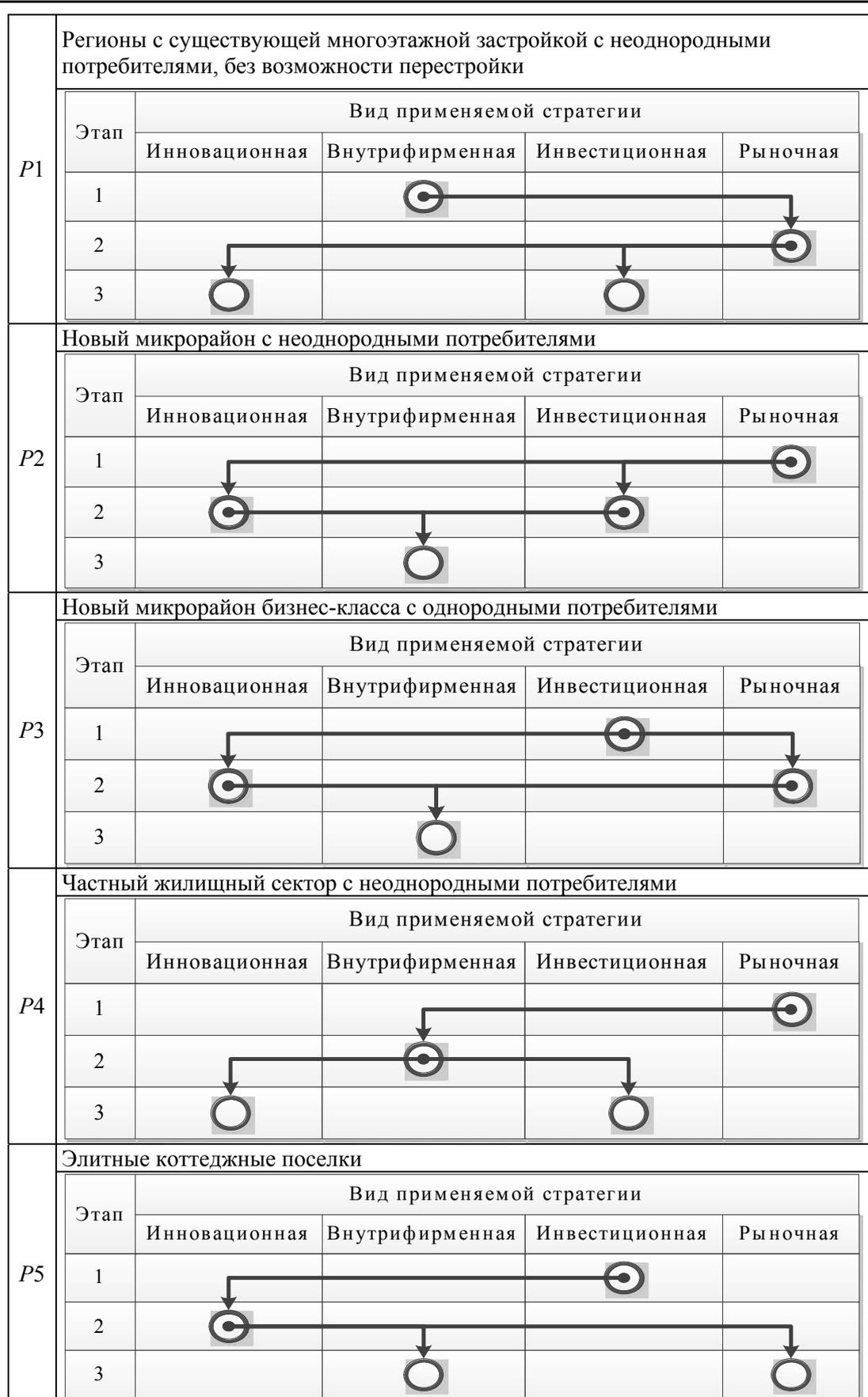


Рис. 4. Варианты стратегического развития сферы ЖКХ в различных условиях

4. *Р4. Частный жилищный сектор с неоднородными потребителями.* С каждым годом объем данного сектора домовладения сокращается, но он по-прежнему остается весьма распространённым в России. Данный вариант является наиболее сложным для развития сферы в связи с сильным разбросом потребностей и отсутствием системности в расположении объектов. Все это значительно затрудняет применение единой стратегии развития, а отсутствие управляющих органов и вовсе делает это практически невозможным.

В рамках реализации данной стратегии, как показали исследования, наиболее оптимальным вариантом интеграции функциональных блоков сферы ЖКХ будет «В1» с возможным переходом в вариант «В8».

5. *Р5. Элитные коттеджные поселки.* Данный вариант функционирования сферы в последние годы становится все более распространенным. Несмотря на то что развитие сферы в условиях этого варианта является самым простым и эффективным, здесь так же присутствуют негативные явления, для преодоления которых необходимо наличие соответствующей стратегии развития.

В рамках реализации данной стратегии необходимо формирование варианта интеграции сферы ЖКХ «В8».

Таким образом, использование маркетинговых подходов и проведение соответствующих исследований на рынке жилья и в сфере ЖКХ позволило разработать механизм формирования вариантов стратегии развития предприятий сферы жилищно-коммунального хозяйства. Что, в свою очередь, позволит: во-первых, выстроить более эффективную модель развития сферы с минимальными затратами ресурсов и времени, во-вторых, повысить инновационно-инвестиционную привлекательность сферы за счет увеличения ее потенциала и минимизации инвестиционных и управленческих рисков путем формирования наиболее оптимального варианта интеграции функциональных блоков сферы.

Кроме того, это создаст необходимые предпосылки, возможности и перспективы для дальнейшего эффективного развития, как отдельных предприятий, так и всей сферы жилищно-коммунального хозяйства в целом в условиях функционирования и развития конкретного региона.

Список литературы

1. Акифьев, И.В. Формирование стратегии развития предприятий строительного комплекса в эффективных зонах деятельности: автореф. дис.... канд. экон. наук: 08.00.05 / И.В. Акифьев. – Пенза, 2010. – 24 с.
2. Мещерякова, О.К. Основные направления формирования инновационно-инвестиционной привлекательности жилищно-коммунальной сферы / О.К. Мещерякова. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 274 с.
3. Формирование рациональных вариантов управления жилищно-коммунальной сферой в России: моногр. / Б.Б. Хрусталеv, О.К. Мещерякова, В.Н. Горбунов, М.Г. Ганиев. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 135 с.

References

1. Akifyev, I.V. Formation of enterprise development strategy of building complex in effective areas of activity: author. dis.... Candidate. Econ. Sciences: 08.00.05 / I.V. Akifyev. – Penza, 2010. – 24 p.
2. Meshcheryakova, O.K. The basic directions of innovation and investment attractiveness of the housing and communal services / O.K. Meshcheryakova. – Voronezh: CPI «Scientific Paper», 2012. – 274 p.
3. Formation of rational choices of housing and communal services in Russia: monograph / B.B. Khrustalev, O.K. Meshcheryakova, V.N. Gorbunov, M.G. Ganiev. – Voronezh: CPI «Scientific Paper», 2012. – 135 p.

*Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д.26,
тел./факс: (8495) 781-80-07

Грабовый Петр Григорьевич,
доктор экономических наук, профессор
*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Матвеев Максим Сергеевич,
аспирант кафедры «Экономика,
организация и управление производством»
E-mail: posh58@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 440028, Moscow, 26,
Yaroslavl highway,
tel./fax: (8495) 781-80-07

Grabovoy Petr Grigorievich,
Doctor of Economic Sciences, Professor
*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Matveev Maksim Sergeevich,
Postgraduate of the department «Economics,
organization and management of production»
E-mail: posh58@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА Г. ПЕНЗЫ НА ОСНОВЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ПОДХОДОВ

П.Г. Грабовый, М.С. Матвеев

Рассматриваются перспективные направления развития инвестиционно-строительного комплекса в Пензенском регионе. Приведены результаты маркетингового исследования рынка. Выявлены основные проблемы и тенденции. Авторами сформированы эффективные организационно-экономические механизмы управления стоимостью объектов недвижимости.

Ключевые слова: инвестиционно-строительный комплекс, доступность жилья, управление, механизмы.

INVESTMENT AND CONSTRUCTION COMPLEX DEVELOPMENT OUTLOOKS IN PENZA BASED ON MARKETING APPROACHES

P.G. Grabovoy, M.S. Matveev

Promising areas of investment and construction industry development in the Penza region are considered. The results of market research are given. The main problems and trends are shown. The authors have built an effective organizational and economic mechanism of real estate value management.

Keywords: investment and construction industry, the availability of housing, management, mechanisms.

Развитие современного инвестиционно-строительного комплекса в России характеризуется невысокой инвестиционной активностью. Причины сложившейся ситуации различны: создание саморегулируемых организаций (СРО) в области строительства, реконструкции, капитального ремонта объектов капитального строительства (строительной деятельности), изменившиеся условия на рынке недвижимости, возросшие социальные потребности населения. Авторами были проведены маркетинговые исследования. Объектами выступали потребители, компании-застройщики, внешняя среда, а также стоимость и классификация готового строительного продукта.

Уровень управления организациями и условия рынка привели к негативным тенденциям в развитии строительства Пензенского региона. Субъекты инвестиционно-строительного комплекса, накопившие значительный опыт в реализации крупных

инвестиционных проектов, не в состоянии полностью реализовать свой потенциал. Тенденции последних несколько лет повлияли на рентабельность проектов в сегментах премиум и бизнес-класса. Застройщик делает акцент на проекты эконом-класса с увеличением площади квартир и стоимости 1 кв.м. Объекты премиум и бизнес-класса составляют менее 25 % от общего числа предложений на рынке.

Под инвестиционно-строительным комплексом (ИСК) следует понимать совокупность организаций и фирм, обеспечивающих формирование благоприятной среды жизнедеятельности человека и производства основных фондов народного хозяйства.

С целью моделирования ситуации и получения результатов авторами был проведен анализ портфелей заказов основных компаний-застройщиков в Пензенском регионе.

Жилье эконом-класса

Компания «Термодом» формирует портфель заказов с учетом требований основной части населения. Жилье эконом-класса является приоритетным для 75–85 % жителей региона. Среди основных проектов компании выделяется микрорайон жилой застройки города «Спутник», расположенного в юго-западной части Пензы, а также точечное возведение нескольких жилых многоквартирных домов в западной части города. Характерной чертой проектов компании является большее процентное содержание однокомнатных квартир и квартир-студий. Целевая ориентированность застройщика подтверждается политикой ценообразования (студия 35 500 руб./кв.м.; 1-комнатная – 33 500 руб./кв.м.; 2- и 3-комнатные – 32 000 руб./кв.м.), проведением различных социальных акций и активным участием в реализации национального проекта «Жилье», в Государственной программе «Обеспечение доступным и комфортным жильём и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» [2], а также в областной программе «Дом для молодой семьи».

Классификация объектов жилого фонда г. Пензы по основным признакам

<p>Бизнес-класс Признаки:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ цена (53 000 руб./кв.м); ▪ элитное месторасположение; ▪ статус соседей; ▪ индивидуальный проект; ▪ высота потолков от 3,0 м; ▪ качественные строительные материалы; ▪ эксклюзивная отделка в соответствии с дизайн-проектом 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ широкий набор объектов социальной и коммерческой инфраструктуры с возможностью контроля доступа посторонних лиц; ▪ собственная служба эксплуатации; ▪ благоустроенная придомовая территория большой площади; ▪ охрана периметра территории, консьерж, домофон; ▪ развитая система объектов социального назначения
<p>Премиум-класс Признаки:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ цена (40 000 руб./кв.м); ▪ расположение в районах с большой концентрацией объектов коммерческого, административного назначения; ▪ индивидуальный проект; ▪ высота потолков от 2,75 м 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ улучшенная отделка; ▪ система безопасности; ▪ благоустроенная придомовая территория; ▪ развитая система объектов социального назначения
<p>Эконом-класс Признаки:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ цена (32 664 руб./кв.м) ▪ местоположение (любое) ▪ транспортная доступность; ▪ типовой проект; ▪ высота потолков менее 2,7 м 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ площадь кухни до 8 кв.м.; ▪ дешевые строительные материалы и конструкции; ▪ придомовая площадь ограниченной площади

Основные причины преобладания эконом-класса (54 %) в структуре жилья Пензенского региона:

- господдержка проектов эконом-класса;
- уровень платежеспособности населения;
- отсутствие квалифицированной рабочей силы;
- изношенность инженерных сетей;
- отсутствие готовых земельных участков;
- низкая рентабельность проектов премиум и бизнес-класса;

Жилье премиум- и бизнес-класса

На строительном рынке любого региона присутствуют компании, реализующие проекты для потребителей разного класса жилья. В Пензенском регионе основные мощности сконцентрированы у холдинга «СКМ Групп». Среди значимых инвестиционных проектов – компании ЖК «Арбековская застава», ЖК «Новый город», совмещающие эконом- и бизнес-класс строительства. Для компании характерна точечная застройка проектов бизнес-класса в центральных районах и комплексная застройка отдаленных частей города.

Зависимость между стоимостью 1 кв.м. жилья г.Пензы и ее привлекательностью для потребителя приведена на рис.1. Под коэффициентом привлекательности следует понимать условный показатель заинтересованности потребителя в покупке 1 кв.м. жилья в зависимости от ее стоимости. В соответствии с увеличением показателя привлекательности от 1 до 10 интерес покупателя к недвижимости растет.

Важность решения проблемы разрыва между спросом и предложением на рынке обусловлена масштабами и перспективами развития ИСК Пензенского региона в целом. В условиях рынка компании-застройщики игнорируют сегменты премиум- и бизнес-класса, считая их менее рентабельными.

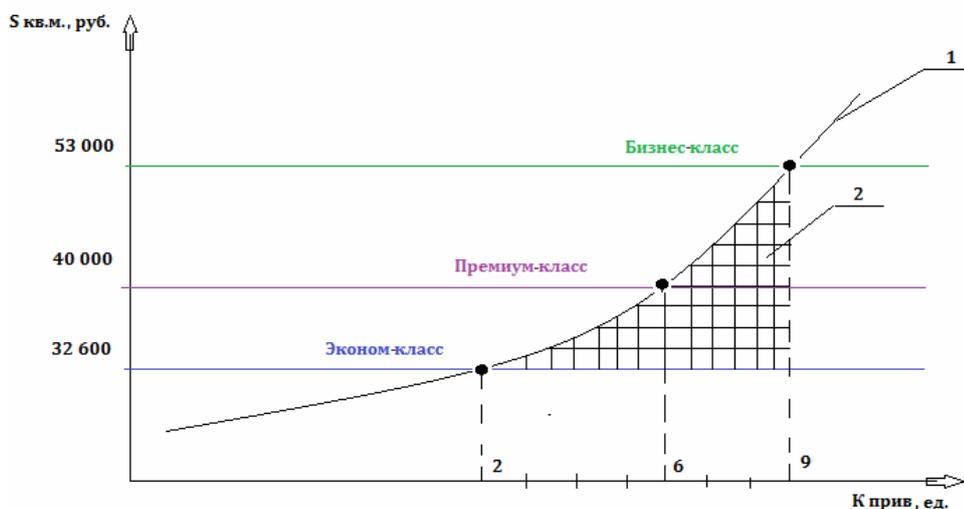


Рис.1. Зависимость стоимости 1 кв.м. жилья от коэффициента привлекательности:

$S_{\text{кв.м., руб.}}$ – цена 1 кв.м. жилья (по данным 2012 г.); $K_{\text{прив, ед.}}$ – коэффициент привлекательности;
 1 – кривая зависимости привлекательности жилья для потребителя от стоимости 1 кв.м.;
 2 – зона разрыва потребительского спроса

Правительство РФ в рамках реализации Государственной программы «Обеспечение доступным и комфортным жильём и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» на 2013–2020 гг. [2] предлагает ряд выходов из сложившейся ситуации на рынке.

В частности, реализуется строительство жилья эконом-класса и объектов инфраструктуры на вовлеченных в экономический оборот земельных участках, примыкающих к крупным городам, а также на неиспользуемых или используемых неэффективно

земельных участках. Большие надежды Правительство РФ возлагает на ипотечные программы.

Программой также предусмотрены:

- снижение процентной ставки по ипотечным жилищным кредитам;
- увеличение объемов ипотечного жилищного кредитования до 868 тыс. кредитов в год в 2020 году;
- государственная поддержка при ипотечном кредитовании отдельных категорий граждан (молодых семей, работников бюджетной сферы).

В результате реализации госпрограммы Правительство РФ ожидает снижения средней стоимости 1 кв.м. к 2018 году примерно на 20 %.

Список решений, предложенных федеральной программой, не является исчерпывающим. Авторы предлагают возвратиться к использованию доходных домов. Доходный дом – многоквартирный жилой дом, построенный для сдачи квартир в аренду. Отличие доходного дома от любого другого жилья состоит в отсутствии возможности для жильцов оформить права собственности на квартиру. За проживание в арендуемой квартире с квартирантов взимается ежемесячная арендная плата. Сегодня 80 % населения, приобретая жилье, обращаются к помощи ипотечных программ.



Рис.2. Блок-схема реализации подхода «доходный дом»

Комплексное освоение целых районов, микрорайонов и пригородных территорий позволяет снизить стоимость жилья. Правительство РФ в состоянии помочь с выделением примыкающих к крупным городам неиспользуемых или используемых неэффективно земельных участков, в подводе инженерных сетей к удаленным площадкам. В таких условиях перспективным видится реализация организованных коттеджных поселков (таунхаусы), в которых будет предусмотрена своя инфраструктура.

Изменения в планировочных решениях многоквартирных жилых домов позволят снизить стоимость 1 кв.м. на 5–10 % (например, использование концепции жилого дома «окольцованная «панель», когда объект принимает форму круга, а все объекты социального назначения располагаются внутри контура дома на придомовой площадке). Таким образом, достигается экономия площади участка и реализуется эффект компактности. В планировки квартир также предлагается внести изменения. Учитывая существующие рыночные условия и потребности населения, возможно проектирование большего количества однокомнатных квартир-студий с увеличением суммарной площади.

Применение типовых проектов при возведении коттеджных поселков в регионе остается малоиспользуемым. Привлечение «длинных» инвестиций – строительство очередями, эффекта масштабности в виде укрупнения проектов, а также частное-государственное партнерство – упростит процесс реализации объектов строительства.

Принимая во внимание вышесказанное, сделаем выводы. Эффективные организационно-экономические механизмы снижения стоимости 1 кв.м. жилья следующие:

1. Реализация строительства жилья эконом-класса и объектов инфраструктуры на вовлеченных в экономический оборот земельных участках, примыкающих к крупным городам, а также на неиспользуемых или используемых неэффективно земельных участках.

2. Государственное субсидирование ипотечных программ.

3. Строительство доходных домов.

4. Комплексное освоение целых районов, микрорайонов и пригородных территорий по типовым проектам.

5. Изменения в планировочных решениях многоквартирных жилых домов (использование концепции жилого дома «окольцованная «панель»).

Список литературы

1. Хрусталеv, Б.Б. Основные направления становления и эффективного развития рационального инвестиционно-строительного комплекса. – Пенза: ПГАСА, 2001. – 222 с.

2. Государственная программа: Обеспечение доступным и комфортным жильём и коммунальными услугами граждан Российской Федерации на 2013–2020 гг. – М., 2012.

3. Информационно-правовой портал «ГАРАНТ».

References

1. Khrustalev, B.B The main directions of the formation and development of effective time management investment-building complex. – Penza: PGASA, 2001. – 222 p.

2. Public program: Providing affordable and comfortable housing and communal services of citizens of the Russian Federation 2013-2020. – M., 2012.

3. Legal information portal «GARANT».

