

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ<br/>ЖУРНАЛ</b><br><b>Выходит 4 раза в год</b>                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Учредитель и издатель</b><br>Пензенский государственный<br>университет архитектуры<br>и строительства                                                                                                                                                                                                                             |
| Главная редакция:<br>А.М. Данилов (главный редактор)<br>Е.В. Королев (заместитель<br>главного редактора)<br>И.А. Гарькина (ответственный<br>секретарь)                                                                                                                                                                               |
| Адрес редакции:<br>440028, г.Пенза, ул.Германа Титова, 28,<br>ПГУАС<br>Тел/факс 8412 929501<br>E-mail: regas@pguas.ru<br>fmatem@pguas.ru<br>www.rais.pguas.ru                                                                                                                                                                        |
| Редакторы: М.А. Сухова,<br>В.С. Кулакова,<br>Н.Ю. Шалимова                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Дизайн обложки Е.Г. Лапшина                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Компьютерная верстка<br>Н.А. Сазонова                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Перевод О.В. Гринцова                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Журнал зарегистрирован<br>в Федеральной службе по надзору<br>за соблюдением законодательства<br>в сфере массовых коммуникаций<br>и охране культурного наследия                                                                                                                                                                       |
| Свидетельство о регистрации<br>ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Подписной индекс:<br><b>36946</b> в каталоге Роспечати                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Авторы опубликованных материалов<br>несут ответственность за достоверность<br>приведенных сведений, точность данных<br>по цитируемой литературе и за исполь-<br>зование в статьях данных, не подлежа-<br>щих открытой публикации.<br>Редакция может опубликовать статьи<br>в порядке обсуждения, не разделяя точку<br>зрения автора. |
| Подписано к печати 16.06.2015.<br>Формат 60x84 1/8.<br>Уч.-изд.л. 19,0. Тираж 500 экз. Первый завод 100.<br>Заказ № 232.                                                                                                                                                                                                             |
| Отпечатано в издательстве ПГУАС                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 2(23)/2015

## Содержание

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ<br>И ИЗДЕЛИЯ .....                                                                                                                                                                                                 | 5  |
| <b>Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф.,<br/>Шабасев И.Н.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОЙ<br>МАТРИЦЫ ДЛЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ                                                                                                     | 5  |
| <b>Данилов А.М., Гарькина И.А., Пышкина И.С.</b><br>СИСТЕМНЫЕ МОДЕЛИ В<br>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ: НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ<br>И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.....                                                                                           | 15 |
| <b>Калашников В.И., Камбург В.Г.,<br/>Суздальцев О.В., Бодажков Н.Ю.</b><br>ОЦЕНКА РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ<br>САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ<br>СМЕСЕЙ ДЛЯ БЕТОНОВ НОВОГО<br>ПОКОЛЕНИЯ .....                                               | 21 |
| <b>Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Чернов А.Н.</b><br>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИНОМЕТ-<br>РИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ<br>ДЕКОРАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОК-<br>СИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ЭКСПОНИ-<br>РУЮЩИХСЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ..... | 27 |
| <b>Максимова И.Н., Ерофеев В.Т.,<br/>Макридин Н.И., Тамбовцева Е.А.</b><br>РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ<br>ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО<br>КАМНЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО СТРУКТУРЫ И<br>ВОЗРАСТА .....                                              | 37 |
| <b>Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Полубаров Е.Н.</b><br>ОЦЕНКА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ПРО-<br>ГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ГЕОПОЛИ-<br>МЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ<br>МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД.....                                             | 45 |
| <b>Черкасов В.Д., Ушкина В.В.</b><br>БЕЛКОВЫЙ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНО-<br>ВЕ ПРОДУКТОВ МИКРОБНОГО СИНТЕЗА<br>ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕСТЫХ БЕТОНОВ ..                                                                                         | 51 |
| <b>Логанина В.И., Жуков А.Н., Пышкина И.С.</b><br>ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ<br>НА ОСНОВЕ СУХОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ<br>С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕЗИРОВАННЫХ<br>ГИДРОСИЛИКАТОВ.....                                                          | 57 |

© Авторы публикаций, 2015  
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2015  
© ПГУАС, 2015

|                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Кочеткова М.В., Гусев Н.И., Аленкина Е.С.</b><br>АТМОСФЕРОСТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНО-<br>ОТДЕЛОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НАРУЖНЫХ<br>СТЕН ИЗ ПЕНОБЕТОНА ПРИ ИХ<br>ПЕРЕМЕННОМ УВЛАЖНЕНИИ,<br>ВЫСУШИВАНИИ И ВОЗДЕЙСТВИИ<br>ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ..... | 61 |
| <b>Жегера К.В., Пышкина И.С., Рыжов А.Д.,<br/>Живаев А.А.</b><br>МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ<br>СЦЕПЛЕНИЯ РАСТВОРНОГО СЛОЯ НА<br>ОСНОВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ<br>СМЕСЕЙ.....                                                         | 64 |
| <b>Гусев Н.И., Кочеткова М.В., Аюпова З.В.</b><br>ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТЬ И<br>ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ<br>ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА ДЛЯ<br>ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНОГО ПОКРЫТИЯ<br>ПЕНОБЕТОНА.....                                                | 68 |
| СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,<br>ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ .....                                                                                                                                                                          | 72 |
| <b>Максимчук Д.Н.</b><br>ОСЕСИММЕТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ<br>ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУХ СООСНЫХ<br>ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШТАМПОВ,<br>КОТОРЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ С<br>ШАРОМ С НАЧАЛЬНЫМИ<br>(ОСТАТОЧНЫМИ) НАПРЯЖЕНИЯМИ....                                | 72 |
| <b>Сорокин Д.С., Береговой В.А.</b><br>ИСКУССТВЕННЫЕ ПОРИСТЫЕ<br>ЗАПОЛНИТЕЛИ НА ОСНОВЕ<br>ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА ..                                                                                                        | 78 |
| <b>Снежкина О.В., Скачков Ю.П., Ладин Р.А.</b><br>ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА<br>ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОРОТКИХ<br>ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК.....                                                                                          | 84 |
| <b>Нежданов К.К., Антонов С.А.</b><br>МОНОЛИТНЫЙ ФУНДАМЕНТ<br>С ТОЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ<br>АНКЕРНЫХ СТЕРЖНЕЙ.....                                                                                                                  | 89 |
| <b>Нежданов К.К., Антонов С.А.</b><br>НОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ<br>СТАЛЕТРУБОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ С<br>ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ ФУНДАМЕНТОМ .                                                                                                          | 93 |
| <b>Вдовин В.М., Ишмаева Д.Д.</b><br>НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ<br>ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕСТКОГО УЗЛА<br>БАЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ.....                                                                                                                 | 97 |

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ.....                                                                                                                                                                | 104 |
| <b>Кошев А.Н.</b><br>НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ<br>МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ<br>ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ<br>ИЗ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ<br>НА ПРОТОЧНЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ<br>ЭЛЕКТРОДЫ..... | 104 |
| <b>Вилкова Н.Г., Дорчина О.В.,<br/>Шумкина А.А., Карев М.Н.</b><br>ОЧИСТКА СТОЧНОЙ ВОДЫ<br>ОТ РАСТВОРЕННОГО ДИЗЕЛЬНОГО<br>ТОПЛИВА .....                                                | 116 |
| <b>Данилов А.М., Гарькина И.А., Сухов Я.И.</b><br>ИТЕРАТИВНЫЙ ТЕОРЕТИКО-<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД<br>ПОСТРОЕНИЯ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА<br>МНОГОЦЕЛЕВЫХ СИСТЕМ.....                       | 120 |
| <b>Аверкин А.Г., Еремкин А.И.,<br/>Родионов Ю.В., Салмин В.В.</b><br>ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА<br>В ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОМ<br>ТЕПЛООБМЕННИКЕ .....                                         | 125 |
| <b>Баканова С.В., Еремкин А.И.</b><br>МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ<br>ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И<br>ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХООБМЕНА В<br>ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ<br>СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ ..... | 130 |
| АРХИТЕКТУРА.....                                                                                                                                                                       | 136 |
| <b>Шестернева Н.Н.</b><br>РОССИЙСКИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ<br>ШКОЛЫ В ХХІ ВЕКЕ .....                                                                                                       | 136 |
| <b>Береговой А.М., Дерина М.А.,<br/>Петрянина Л.Н.</b><br>ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ<br>ЭФФЕКТИВНОСТЬ<br>ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕШЕНИЙ В<br>АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ<br>ПРОЕКТИРОВАНИИ .....   | 144 |
| ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ .....                                                                                                                                                           | 149 |
| <b>Учаева Т.В., Тусков А.А.</b><br>АНАЛИЗ ЗАТРАТ НА ПРОЦЕСС<br>МАЛЯРНЫХ РАБОТ С<br>ГАРАНТИРОВАННЫМ УРОВНЕМ<br>КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ.....                                                   | 149 |

Contents

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....                                                                                                                                                                           | 5   |
| <b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Shabayev I.N.</b><br>INVESTIGATION OF EPOXY MATRIX PROPERTIES FOR COMPOSITE REINFORCEMENT .....                                                                    | 5   |
| <b>Danilov A.M., Garkina I.A., Pyshkina I.S.</b><br>SYSTEM MODELS IN MATERIALS SCIENCE: SOME RESULTS AND PROSPECTS.....                                                                                        | 15  |
| <b>Kalashnikov V.I., Kamburg V.G., Suzdaltsev O.V., Bodazhkov N.Y.</b><br>ASSESSMENT OF NEOTECHNOLOGIES PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIXES FOR CONCRETES OF NEW GENERATION.....                      | 21  |
| <b>Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Chernov A.N.</b><br>MODELLING OF INFLUENCE OF ACTINOMETRIC PARAMETERS ON OF DECORATIVE CHARACTERISTICS CHANGE OF EPOXY COMPOSITES, EXPOSED IN NATURAL CONDITIONS ... | 287 |
| <b>Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Tambovzeva E.A.</b><br>REGRESSION DEPENDENCY OF BASIC PROPERTIES OF CEMENT STONE WITH CHANGE OF ITS STRUCTURE AND AGE.                                         | 37  |
| <b>Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Polubarov E. N.</b><br>ESTIMATING STRUCTURE OF FORMATION AND FORECASTING OF STRENGTH OF GEOPOLYMER BINDER BASED ON MAGMATIC ROCKS .....                                      | 45  |
| <b>Cherkasov V.D., Ushkina V.V.</b><br>PROTEIN FOAM GENERATOR ON THE BASIS OF MICROBE SYNTHESIS PRODUCTS FOR CELLULAR CONCRETE PRODUCTIONS.....                                                                | 51  |
| <b>Loganina V.I., Zhukov A.N., Pyshkina I.S.</b><br>EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF COATINGS ON BUILDING MIXES WITH APPLICATION OF SYNTHETIC HYDROUS SILICATE.....                                           | 57  |
| <b>Kochetkova M.V., Gusev N.I., Alenkina E.S.</b><br>WEATHER PROOFFINISH COATING FOR EXTERNAL WALLS MADE OF FOAM CONCRETE UNDER VARIABLE HUMIDIFICATION, DRYING AND EXTREMELY HIGH TEMPERATURES.....           | 61  |
| <b>Zhegera C.V., Pyshkina I.S., Ryzhov A.D., Zhivaev A.A.</b><br>METHOD OF ASSESSMENT ADHESION STRENGTH OF SOLUTION LAYER BASED ON DRY MIXES.....                                                              | 64  |
| <b>Gusev N.I., Kochetkova M.V., Aiupova Z.V.</b><br>MOISTURE AND WATER VAPOR PERMEABILITY OF POLYMER-MODIFIED MORTAR FOR PROTECTIVE FINISH COATING OF FOAM CONCRETE.....                                       | 68  |
| BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS .....                                                                                                                                                         | 72  |
| <b>Maksimchuk D.N.</b><br>AXIS-SYMMETRICAL CONTACT INTERACTION OF RESILIENT RECTANGULAR DIE AND A HALF PLANE WITH INITIAL (RESIDUAL) TENSION.....                                                              | 72  |
| <b>Sorokin D.S., Beregovoy V.A.</b><br>ARTIFICIAL POROUS FILLERS ON THE BASIS OF GRANULATED FOAMGLASS ...                                                                                                      | 78  |
| <b>Snezhkina O.V., Skachkov Y.P., Ladin R.A.</b><br>EMPIRICAL METHOD CRACKING TOUGHNESS CALCULATING OF SHORT REINFORCED CONCRETE BEAMS.....                                                                    | 84  |
| <b>Nezhdanov K.K., Antonov S.A.</b><br>SOLID FOUNDATION WITH EXACT LOCATION OF ANCHOR RODS.....                                                                                                                | 89  |
| <b>Nezhdanov K.K., Antonov S.A.</b><br>NEW CONNECTION STEELTUBECONCRETE COLUMN WITH REINFORCED BASES .....                                                                                                     | 93  |
| <b>Vdovin V.M., Ishmaeva D.D.</b><br>STRESS STATE OF RIGID UNIT ELEMENTS OF BEAN STRUCTURE .....                                                                                                               | 97  |
| ENGINEERING SYSTEMS.....                                                                                                                                                                                       | 104 |
| <b>Koshev A.N.</b><br>SOME FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF EXTRACTION OF METALS FROM ELECTROLYTES ON FLOW-THROUGH THREE-DIMENSIONAL ELECTRODES.....                                                       | 104 |
| <b>Vilkova N.G., Dorchina O.V., Shumkina A.A., Karev M.N.</b><br>CLEANING WASTE WATER FROM DISSOLVED DIESEL FUEL .....                                                                                         | 116 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Danilov A.M., Garkina I.A., Sukhov Y.I.</b><br>THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ITERATIVE METHOD OF FORMATION THE QUALITY CRITERIA OF MULTI-PURPOSE SYSTEMS.....   | 120 |
| <b>Averkin A.G., Eremkin A.I., Rodionov Y.V., Salmin V.V.</b><br>INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN AIR-TO-AIR HEAT EXCHANGER .....                              | 125 |
| <b>Bakanova S.V., Eremkin A.I.</b><br>METHOD OF ASSESSMENT OF EFFECIENCY AND DEFINITION OF AIR DISTRIBUTION IN STORAGE ROOMS OF PERISHABLE PRODUCTS .....         | 130 |
| ARCHITECTURE .....                                                                                                                                                | 136 |
| <b>Shesterneva N.N.</b><br>RUSSIAN URBAN PLANNING SCHOOLS IN THE XXI CENTURY .....                                                                                | 136 |
| <b>Beregovoy A.M., Derina M.A., Petryanina L.N.</b><br>TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ENERGY SAVING SOLUTIONS IN ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION DESIGN ..... | 144 |
| ECONOMICS AND MANAGEMENT..                                                                                                                                        | 149 |
| <b>Uchaeva T.V., Tuskov A.A.</b><br>ANALYSIS OF COSTS OF PAINTING WORK WITH A GUARANTEED LEVEL OF COATINGS QUALITY .....                                          | 149 |

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.618.92

Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева

Россия, 430000, г. Саранск,  
ул. Большевикская, д. 68,  
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

**Селяев Владимир Павлович**,  
академик РААСН, доктор технических  
наук, профессор, зав. кафедрой  
«Строительные конструкции»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Селяев Павел Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Алимов Марат Фатихович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»

**Шабаяев Ильшат Наилевич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»

Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev

Russia, 430000, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.,  
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

**Seljaev Vladimir Pavlovich**,  
Academician of the Russian Academy of  
Architectural and Construction Sciences,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Building structures»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Seljaev Pavel Vladimirovich**,  
Candidat of Sciences, Associate Professor  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Alimov Marat Fatihovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
structures»

**Shabayev Il'shat Nailevich**,  
Postgraduate of the department «Building  
structures»

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов, И.Н. Шабаяев

Исследованы термостойкость эпоксидных композиций на основе эпоксидной смолы и предельная сорбционная емкость эпоксидных композитов, что дает возможность определять коэффициент эффективной диффузии и анализировать изменение проводимости во времени.

*Ключевые слова:* арматура, композит, эпоксидное вяжущее, продольный изгиб, ровинг, матрица

## INVESTIGATION OF EPOXY MATRIX PROPERTIES FOR COMPOSITE REINFORCEMENT

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, M.F. Alimov, I.N. Shabayev

Thermal stability of epoxy compositions based on epoxy resins and limit sorption capacity of epoxy composites which makes it possible to determine the effective diffusion coefficient and analyze the change in conductivity in time is investigated.

*Keywords:* reinforcement, composite epoxy binder, buckling, roving, matrix

Полимерная композитная арматура является новым материалом на строительном рынке. Актуальность и перспективность применения арматуры на основе эпоксидных вяжущих с различными волокнистыми составляющими (стекло-, базальто-, углеволоконна) обосновываются во многих публикациях. Поэтому появляется необходимость изучения свойств, особенностей работы при различных условиях эксплуатации и усовершенствования составов и свойств для эффективного применения данного материала.

С 1 января 2014 года введен в действие ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций», которым установлены общие технические требования на полимерную арматуру по щелочестойкости, огнестойкости и пожарной безопасности: по предельной температуре эксплуатации – до 60°C, снижение предела прочности после выдержки в щелочной среде – не более 25 % [1].

В предыдущих работах [2–5] было установлено, что при испытании стекловолоконных композитов компании «АРМАСТЕКС» с повышением температуры окружающей среды до 60°C значительно снижаются ее механические характеристики.

В работе [6] показано, что свойства полимерных композитов можно улучшить введением в качестве наполнителя оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ).

Для повышения предельной температуры эксплуатации, щелочестойкости предлагаем изучить влияние отвердителя (полиэтиленполиамины) и наполнителя ( $Al_2O_3$ ) на механические характеристики эпоксидного композита.

План эксперимента был принят в виде матрицы Кифера-Коно, в которой в качестве выходного параметра рассматривались показатели: модуль упругости ( $y_1$ ), предел прочности при растяжении ( $y_2$ ), разрушающая сила ( $y_3$ ), прогиб ( $y_4$ ). Варьируемыми переменными приняты процентное содержание от массы эпоксидной смолы ЭД-20 отвердителя полиэтиленполиамины ПЭПА ( $x_1$ ) и наполнителя оксида алюминия  $Al_2O_3$  ( $x_2$ ).

Математическая модель предложена в виде регрессионного уравнения второго порядка:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (1)$$

Переменные факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Факторы и уровни их варьирования

| Факторы       | Кодовое обозначение | Значения факторов и их интервалы варьирования |    |    |          |
|---------------|---------------------|-----------------------------------------------|----|----|----------|
|               |                     | –                                             | 0  | +  | Интервал |
| ПЭПА, %       | $X_1$               | 10                                            | 15 | 20 | 5        |
| $Al_2O_3$ , % | $X_2$               | 10                                            | 20 | 30 | 10       |

По плану эксперимента были изготовлены образцы 20×20×70 мм эпоксидных композитов 9 составов. После отверждения образцы были испытаны на поперечный изгиб по ГОСТ 25.604–82 при температуре 20°C и 70°C. Общий вид испытания образцов на прессе Wille geotechnik 13DP/401, который снабжен климатической камерой, дающей возможность испытывать материалы и изделия в температурном диапазоне от -40 до +100 °C, показан на рис. 1.

В результате экспериментальных исследований установлено (рис.2), что наиболее термостойкими являются составы под номерами 1, 3 и 7. Анализ данных, представленных на рис. 2 и в табл. 2, позволил определить значения коэффициентов регрессии:

$$[B] = (X^T \cdot [X])^{-1} \cdot X^T \cdot [Y]. \quad (2)$$

Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Матрица планирования |       |       |           |         |         | $\bar{y}_n$ | $\hat{y}_i$ |
|-------------|----------------------|-------|-------|-----------|---------|---------|-------------|-------------|
|             | $x_0$                | $x_1$ | $x_2$ | $x_1 x_2$ | $x_1^2$ | $x_2^2$ |             |             |
| 1           | +                    | +     | +     | +         | +       | +       | 542,96      | 541,52      |
| 2           | +                    | -     | +     | -         | +       | +       | 18,59       | 4,705       |
| 3           | +                    | +     | -     | -         | +       | +       | 455,58      | 456,75      |
| 4           | +                    | -     | -     | +         | +       | +       | 88,4        | 77,10       |
| 5           | +                    | 0     | +     | 0         | 0       | +       | 49,63       | 64,95       |
| 6           | +                    | 0     | -     | 0         | 0       | +       | 48,45       | 58,70       |
| 7           | +                    | +     | 0     | 0         | +       | 0       | 491,09      | 491,43      |
| 8           | +                    | -     | 0     | 0         | +       | 0       | 7,98        | 33,21       |
| 9           | +                    | 0     | 0     | 0         | 0       | 0       | 79,72       | 54,15       |

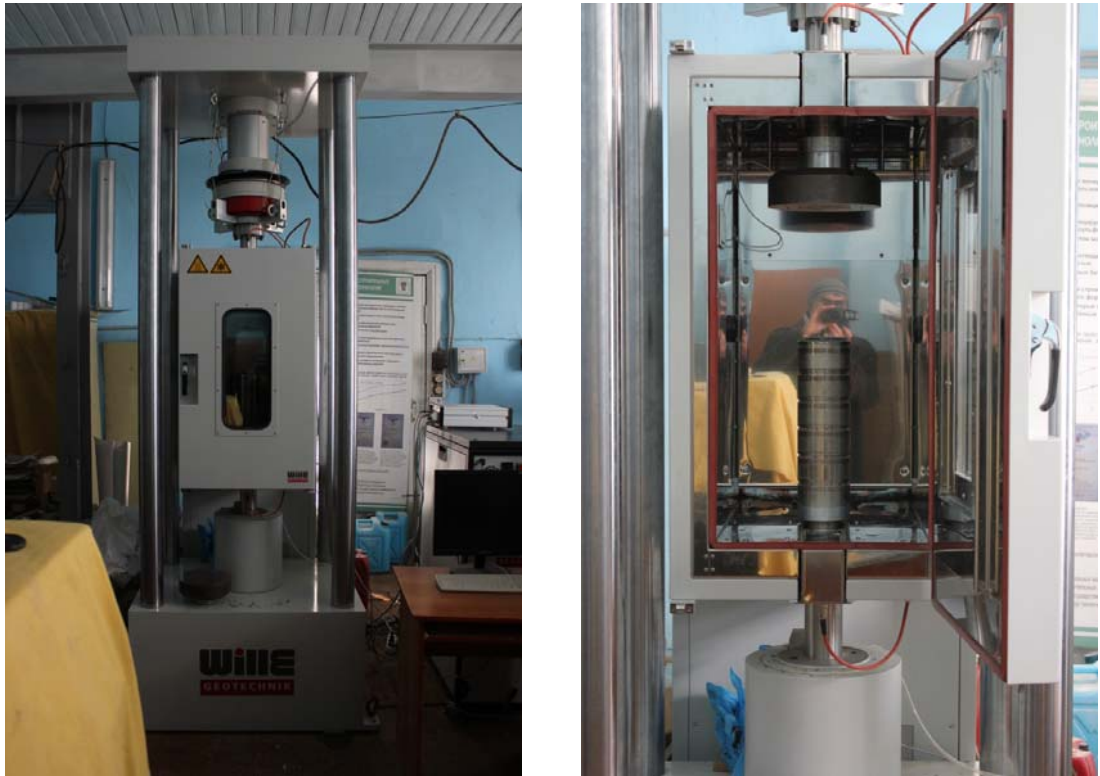


Рис. 1. Общий вид испытания образца 20×20×70 на прессе Wille geotechnik 13 DP/401

Матрицы  $X$ ,  $Y$  следуют из плана эксперимента и экспериментальных данных (см. табл. 2) и имеют вид:

$$[X] = \begin{bmatrix} + & + & + & + & + & + \\ + & - & + & - & + & + \\ + & + & - & - & + & + \\ + & - & - & + & + & + \\ + & 0 & + & 0 & 0 & + \\ + & 0 & - & 0 & 0 & + \\ + & + & 0 & 0 & + & 0 \\ + & - & 0 & 0 & + & 0 \\ + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [Y] = \begin{bmatrix} 542,96 \\ 18,59 \\ 455,58 \\ 88,4 \\ 49,63 \\ 48,45 \\ 491,09 \\ 7,98 \\ 79,72 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты регрессии уравнения (1) в результате решения уравнения (2) принимают следующие значения:

$$b_0 = 54,15; b_1 = 229,11; b_2 = 3,125; b_{12} = 39,3; b_{11} = 208,17; b_{22} = 7,67;$$

при этом

$$y_1 = 54,15 + 229,11x_1 + 3,126x_2 + 39,3x_1x_2 + 208,17x_1^2 + 7,67x_2^2.$$

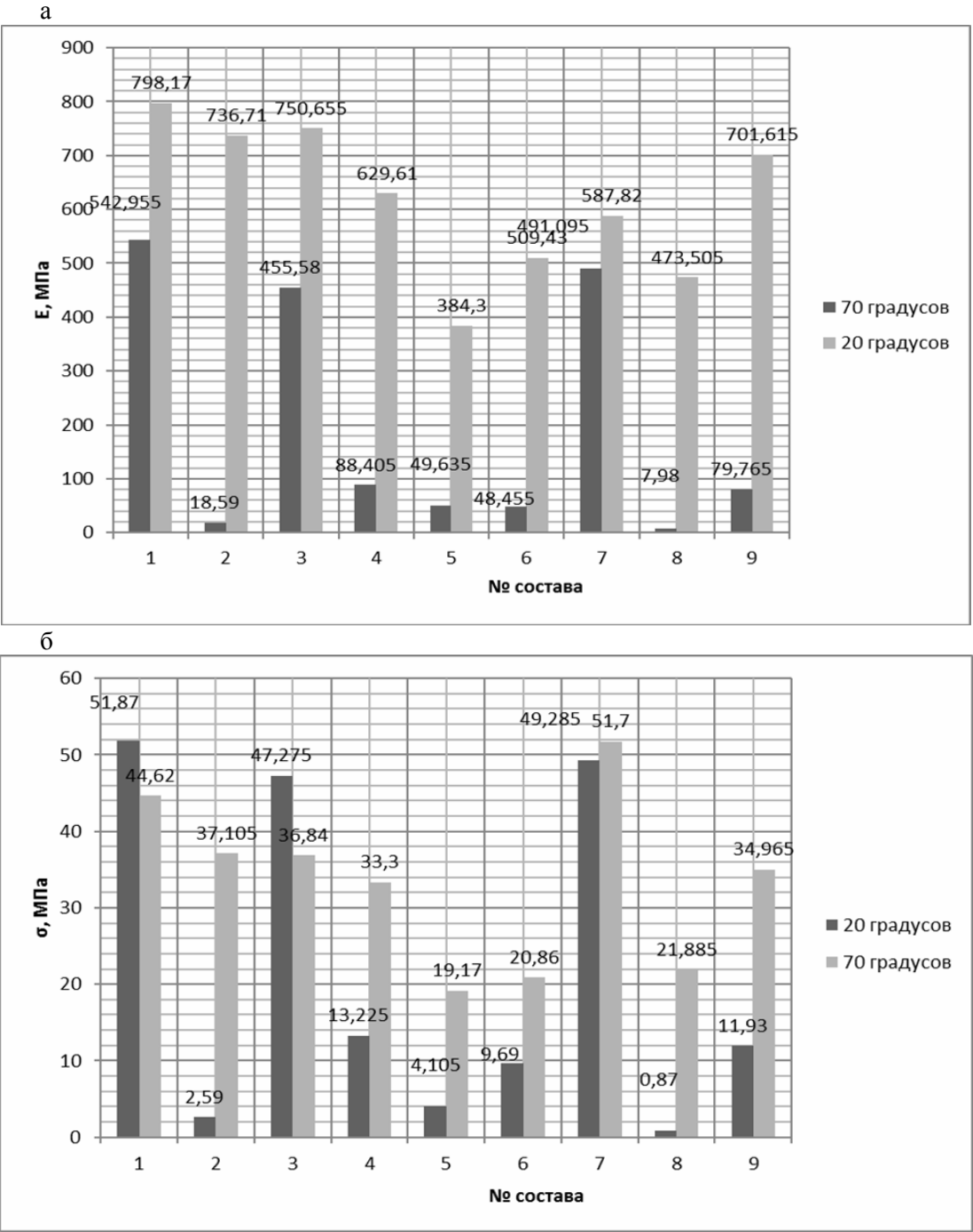


Рис. 2. Значения модуля упругости (а) и предела прочности при растяжении (б), матрицы композита для 9 составов, испытанных при температуре 70°C и 20°C

Расчетные значения  $\hat{y}_i$ , определенные по уравнению регрессии (3), имеют хорошую сходимость с экспериментальными значениями  $y_i$  выходного параметра (см. табл. 2).

Для статистического анализа полученных результатов найдем среднее арифметическое значение выходного параметра  $\bar{y}_i$  в отдельном опыте и определим среднее квадратичное по формуле

$$S_{\text{ош}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{n-1}}.$$

Тогда дисперсия воспроизводимости будет равна:

$$S_{\{y\}}^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^n (y_{iu} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (n-1)}} = 35110,79.$$

Проверим адекватность полученной полиномиальной модели с помощью критерия

Фишера  $F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\{y\}}^2}$ , где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности, определяемая по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_i)^2}{N - k - 1} = 54276,92.$$

Расчетное значение критерия Фишера будет равно:

$$F_{\text{расч}} = 54276,92/35110,79 = 1,55.$$

Табличное значение критерия Фишера для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  составит:  $F_{\text{табл}} = 3,37$ .

Уравнение можно считать адекватным с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$ , так как  $F_{\text{расч}} = 1,55 < F_{\text{табл}} = 3,37$ .

Зависимости выходных параметров  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  и  $y_4$  от содержания отвердителя ПЭПА ( $x_1$ ) и оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x_2$ ) представлены на рис.3–6.

Из анализа графиков видно, что при  $x_1 = +1$  и  $x_2 = +1$  модуль упругости имеет максимальные значения.

Разработанный состав матрицы эпоксидного композита был применен для изготовления стеклопластиковой арматуры на саранском заводе ККМ. Арматура была испытана методом продольного изгиба при температуре 20, 40, 70, 100°C.

Полученные результаты приведены на рис.7, из анализа которых следует, что повышение механических характеристик наблюдается при температуре 40 °C. Это объясняется увеличением и упрочнением связей между составляющими композита.

Для изучения работы арматуры в агрессивной среде капиллярной жидкости бетона были проведены сорбционные испытания, которые дают возможность определить коэффициент диффузии как основной показатель химического сопротивления композита.

В процессе испытания 10 образцов диаметром 8,563 мм экспонировались в водном растворе NaOH с pH = 12 при нормальных температурных условиях. Образцы периодически взвешивались для определения изменения массы. По полученным данным был построен график изменения массы во времени  $\omega(t)$  (рис. 8). Также был построен график зависимости изменения массы от длительности экспонирования в координатах « $1/\omega \div (1/t)$ » (рис. 9).

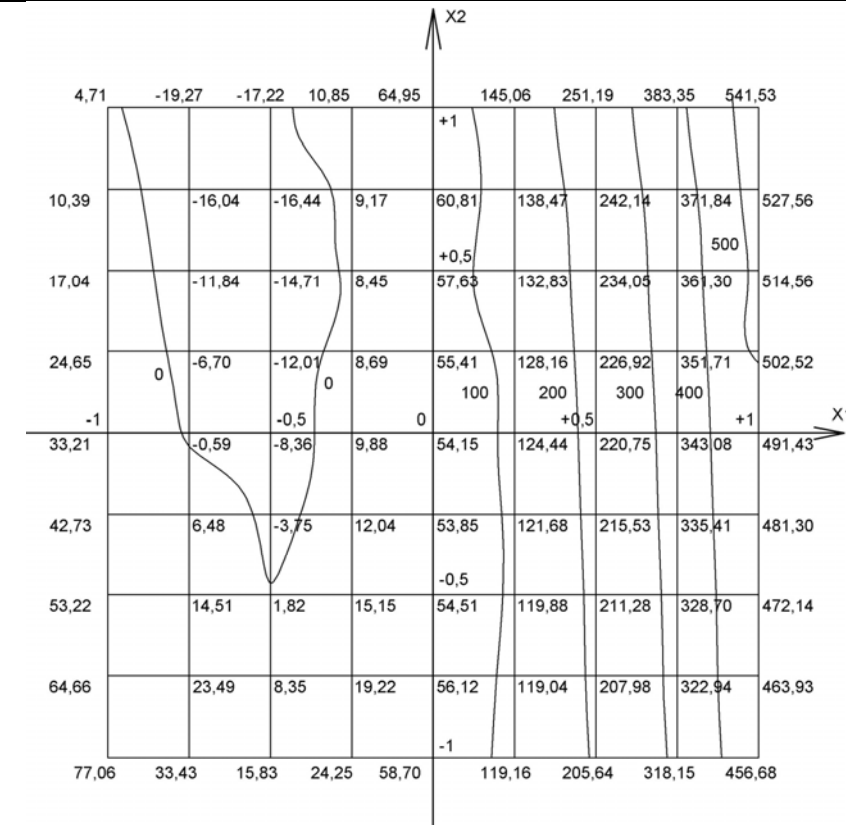


Рис. 3. Зависимость модуля упругости ( $E$ ) от содержания отвердителя ПЭПА ( $x_1$ ) и оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x_2$ )

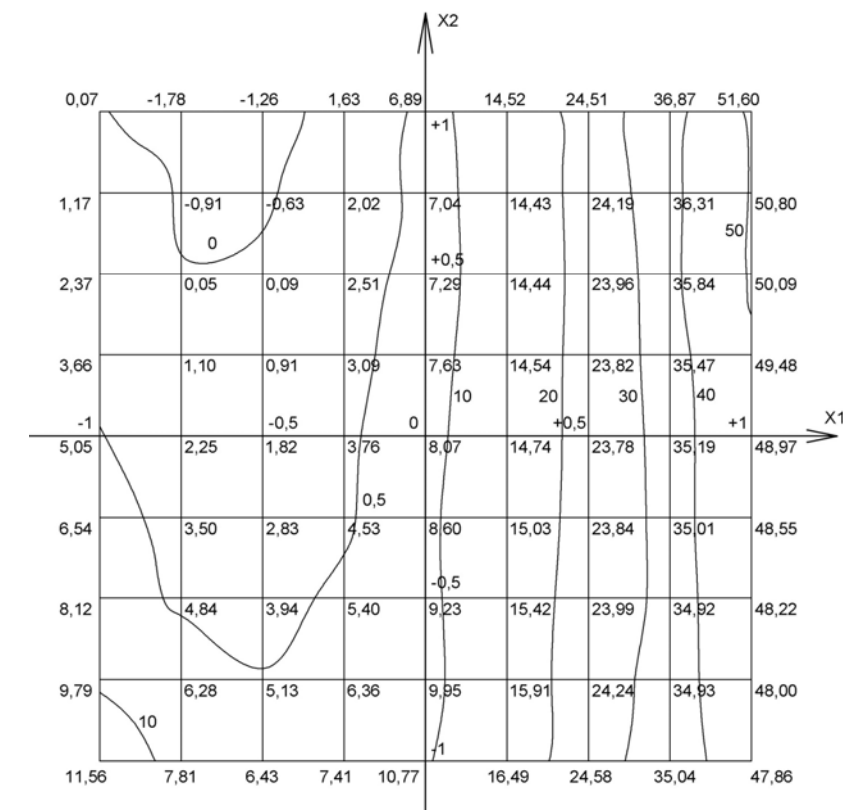


Рис. 4. Зависимость предела прочности при растяжении ( $y_2$ ) от содержания отвердителя ПЭПА ( $x_1$ ) и оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x_2$ )



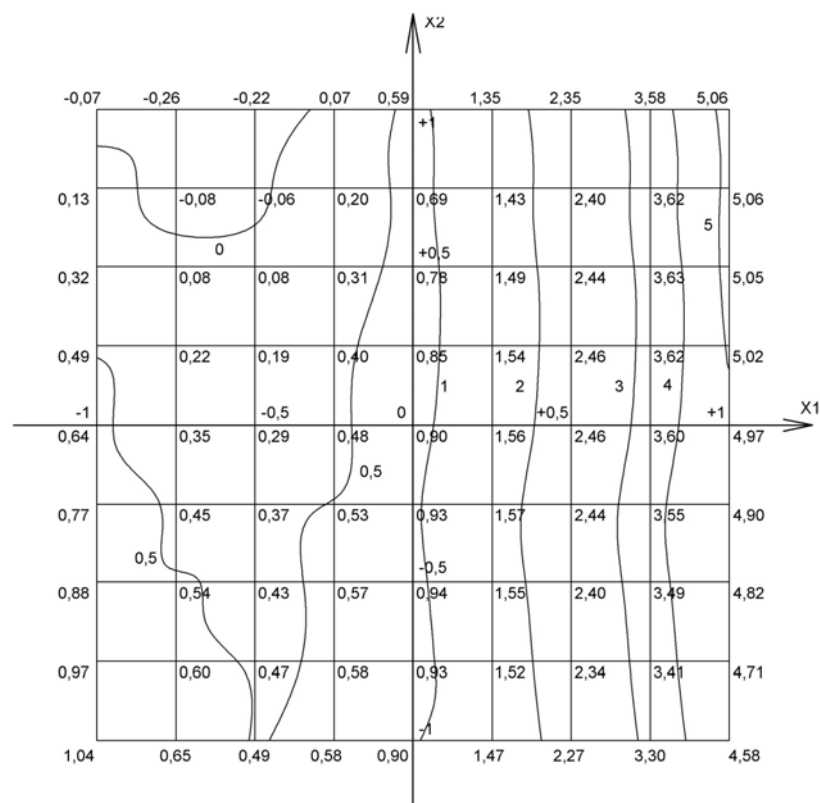


Рис. 5. Зависимость разрушающей нагрузки ( $N_{\text{разр}}$ ) от содержания отвердителя ПЭПА ( $x_1$ ) и оксида алюминия  $Al_2O_3$  ( $x_2$ )

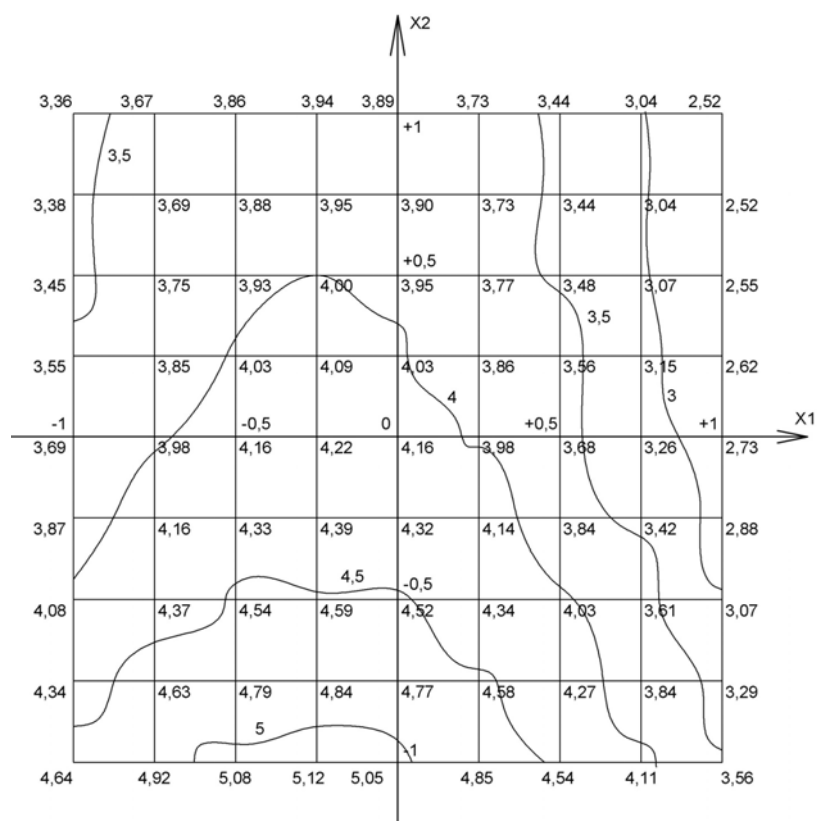


Рис. 6. Зависимость прогиба ( $w$ ) от содержания отвердителя ПЭПА ( $x_1$ ) и оксида алюминия  $Al_2O_3$  ( $x_2$ )

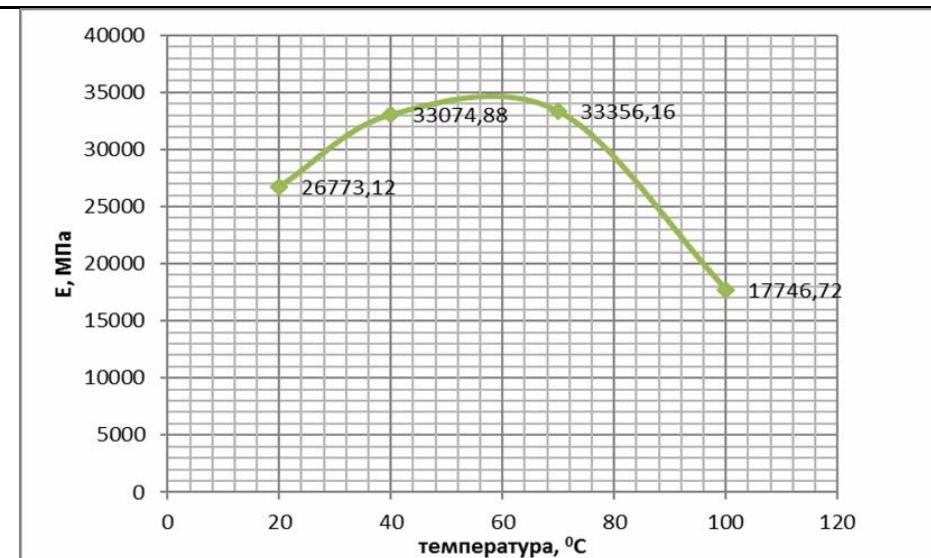


Рис. 7. График зависимости модуля упругости от температуры эксплуатации

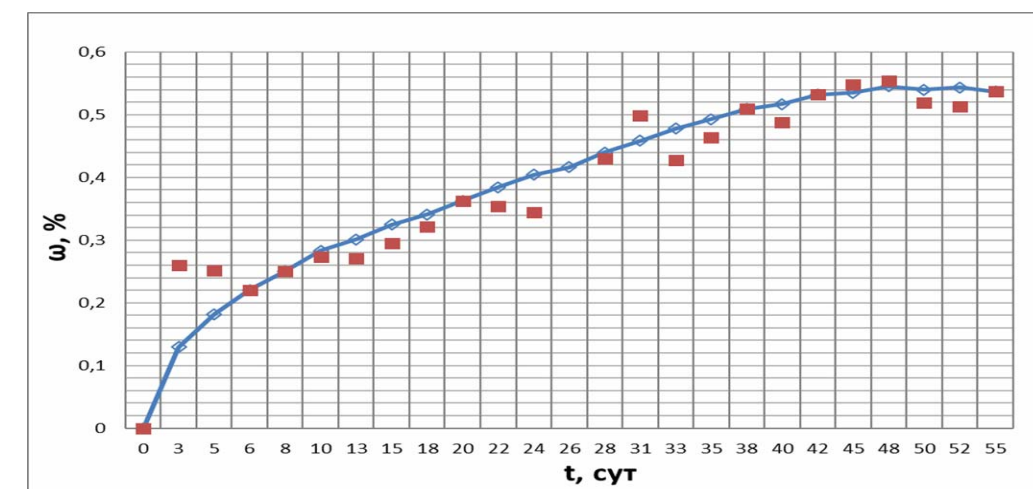


Рис. 8. График изменения массы ( $w(t)$ ) стеклопластиковой арматуры с добавкой  $Al_2O_3$  в растворе NaOH с pH = 12 при нормальных условиях

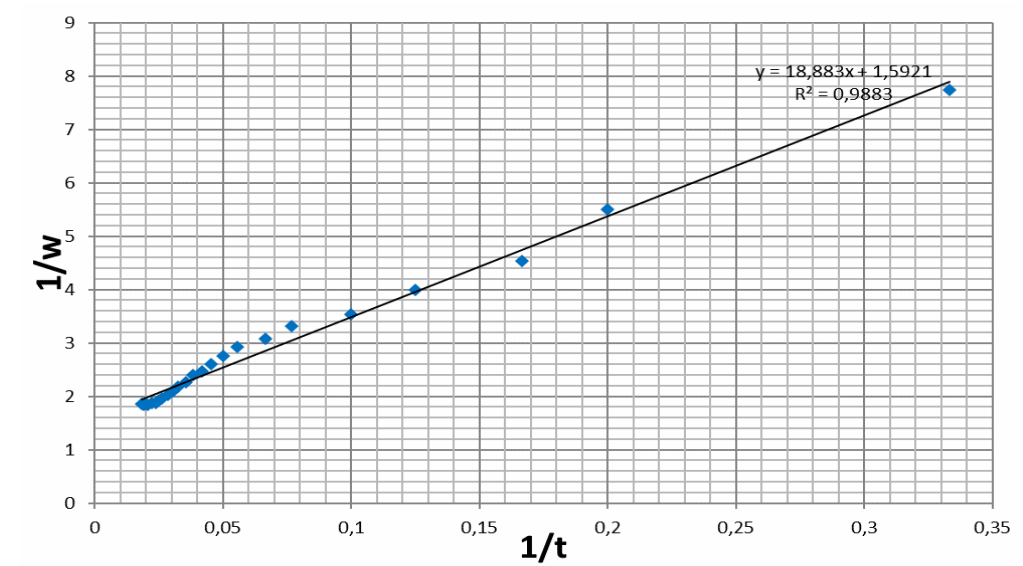


Рис. 9. График изменения массы стеклопластиковой арматуры с добавкой  $Al_2O_3$  в растворе NaOH с pH = 12 в осях « $1/w \div (1/t)$ »

При  $t \rightarrow \infty$   $1/\omega = 1,6$ . Полученное значение дает возможность определить предельную сорбционную емкость композита:  $\omega_0 = 1/1,6 = 0,628$ . Тогда коэффициент диффузии вычисляется по формуле

$$D_m = \left[ \ln \frac{8}{\pi} - \ln \left( 1 - \frac{\omega(t)}{\omega_0} \right) \right] \cdot \frac{4d^2}{\pi^2 T}, \quad (3)$$

где  $d = 8,563$  мм = 0,008563 м – диаметр исследуемых образцов.

Задаваясь соотношением  $\frac{\omega(t)}{\omega_0}$ , по кривой сорбции находим соответствующее значение  $t$  и определяем по формуле (3) значение  $D$ . По расчетным данным был построен график изменения коэффициента диффузии с течением времени  $D_m(t)$  (рис. 10).

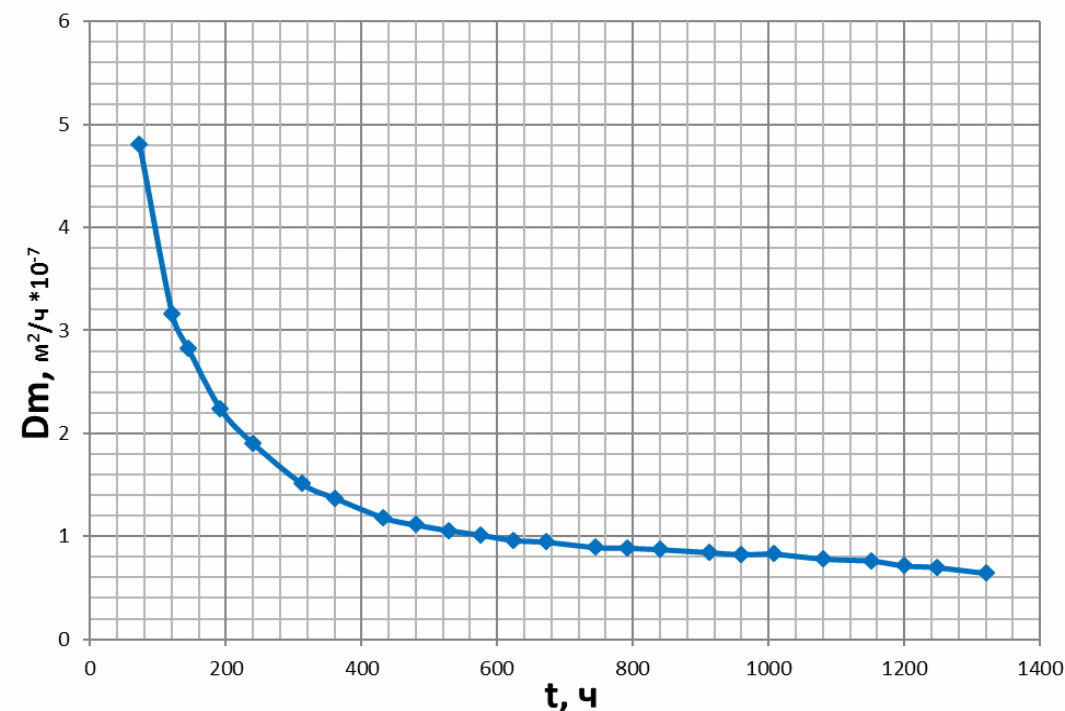


Рис. 10. График изменения коэффициента диффузии

Из графика на рис. 10 следует, что процесс переноса щелочной среды в эпоксидный композит самотормозящийся и коэффициент диффузии в расчетах можно принимать равным  $0,6 \cdot 10^{-7}$  м²/ч.

#### ВЫВОДЫ

1. Термостойкость эпоксидных композиций на основе эпоксидной смолы ЭД-20 повышается с увеличением количества отвердителя (ПЭПА) от 10 до 20 % и практически не зависит от изменения содержания в пределах от 10 до 30 % оксида алюминия.
2. Предельная сорбционная емкость эпоксидных композитов, определяемая по сорбционным кривым, дает возможность определить коэффициент эффективной диффузии и оценивать химическое сопротивление композитов.

#### Список литературы

1. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций.
2. Селяев, В.П. Исследование свойств волокнистых композитов методом продольного изгиба / В.П. Селяев, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов, И.Н. Шабает // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 5–15.

3. Арматура композитная / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Д.Р. Низин, М.Ф. Алимов, И.Н. Шабает: пат. на полезную модель RUS150463, 28.07.2014.
4. Алимов, М.Ф. Определение механических характеристик и свойств композитных арматурных стержней методом продольного изгиба / М.Ф. Алимов, В.П. Селяев, И.Н. Шабает // Огарёв-Online. – 2014. – № С2 (40). – С. 6.
5. Работа балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой / В.П. Селяев, А.А. Соловьев, Р.Н. Парамонов, М.Ф. Алимов, И.Н. Шабает // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 67–73.
6. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композитных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.

#### References

1. GOST 31938-2012. Composite polymer reinforcement for concrete structures.
2. Study of properties of fiber reinforced composites by the method of longitudinal bending / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, M.F. Alimov, I.N. Shabaev // Regional architecture and construction. – 2014. – No. 2. – P. 5–15.
3. Selyaev, V.P. The composite reinforcement / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, D.R. Nisin, M.F. Alimov, I.N. Shabaev // Patent for useful model RUS150463, 28.07.2014.
4. Alimov, M.F. Determination of mechanical characteristics and properties of composite reinforcing bars by longitudinal bending / M.F. Alimov, V.P. Selyaev, I. N. Shabaev // The Ogarev-Online. – 2014. – No. C2 (40). – P.6.
5. Beams with composite fiberglass reinforcement / V.P. Selyaev, A.A. Soloviev, R.N. Paramonov, M.F. Alimov, I.N. Shabaev // Regional architecture and construction. – 2013. – No. 3. – P. 67–73.
6. Solomatov, V.I. Chemical resistance of composite building materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev. – M.: Stroyizdat, 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

**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

**Пышкина Ирина Сергеевна**, аспирант  
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

**Pyshkina Irina Sergeevna**, Postgraduate  
E-mail: fmatem@pguas.ru

# СИСТЕМНЫЕ МОДЕЛИ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ: НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.С. Пышкина

Приводится краткий обзор по использованию системного подхода при синтезе композиционных материалов. Определяются методологические основы построения обобщенной и частных моделей для оптимизации свойств и структуры материалов.

*Ключевые слова: композиционные материалы, материалы как системы, структура и свойства, системный подход, системные модели, сепаратные модели*

## SYSTEM MODELS IN MATERIALS SCIENCE: SOME RESULTS AND PROSPECTS

A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.S. Pyshkina

A brief review on the use of a systematic approach for the synthesis of composite materials is given. Methodological foundations of building generalized and partial models to optimize the properties and structure of materials are determined.

*Keywords: composite materials, materials as system, properties and structure, systematic approach, system model, separate model*

Традиционные методы проектирования материалов оказались недостаточными для регулирования их структуры и свойств. В связи с этим к настоящему времени сформировалась системология как новая методология научных исследований. Когда речь идет о проблемах не только науки, но и практики и когда существенным условием для решения проблемы является сочетание усилий представителей разных научных дисциплин и разных сфер практики, часто используется термин «комплексный подход». Однако эффективность его применения пока недостаточна в связи со слабой методологической разработкой такого подхода. Вообще говоря, использование комплексного подхода отдельно от системного, по-видимому, невозможно, а попытки рассматривать его как самостоятельный метод во многом связаны с утратой в нем научного смысла. Фактически подразумевается стремление охватить как можно больше сторон, свойств, явлений с претензиями на всеохватность, но при отсутствии

научных принципов их рассмотрения. Скорее всего, комплексный подход можно рассматривать как некоторую разновидность системного подхода. Следует помнить, что не всякое исследование системы является системным: системы могут изучаться и несистемным путем. Исследование будет комплексным, если построено на принципах системности.

Каждый из основных разделов системологии имеет характер самостоятельной научной дисциплины и содержит разработку системного, синергетического, информационного и гомеостатического подходов к исследованию системы.

*В системном подходе* предполагается целостное видение сложного объекта (явления, процесса); наличие доминирующей роли целого над частным, сложного над простым; невозможность познания главных свойств системы на уровне изучения только характеристик ее элементов (свойства системы не сводятся к сумме свойств ее элементов). В системе ее элементы соединены отношениями, порождающими интегративное качество. *При отсутствии интегративного качества сложный объект не является системой.*

С точки зрения *синергетического подхода* порядок и хаос взаимосвязаны и порождают друг друга; наряду с детерминизмом неотъемлемыми свойствами природы и общества являются неопределенность и случайность. Хаос – не только полная дезорганизация и разрушение структуры (процесса или явления), но и потенциальный источник нового развития более сложной и высокоорганизованной системы.

*В информационном подходе* информация рассматривается как мера порядка, противостоящего хаосу; мера сложности системы; характеристика внутреннего разнообразия системы; мера вероятностного выбора одной из возможных траекторий развития.

В основе *гомеостатического подхода* лежит определение механизмов управления системами для поддержания в допустимых пределах жизненно важных для систем параметров (поддержание путем управления интегративными параметрами системы в допустимых пределах и, следовательно, сохранение системы – *гомеостазис системы*).

Приложения методов системного анализа к теории и практике синтеза и конструирования структур строительных композитов, раскрытию химико-технологической сущности формирования их качества, обоснованию методологических подходов теоретических и экспериментальных разработок (предопределяют принципы обеспечения фундаментальности и научной и практической ценности результатов) четко сформулированы в [1, 2]. Количественное описание процессов структурообразования здесь рассматривается как необходимое условие для решения задач управления и оптимизации производства. Определяются трудности количественного описания технологических процессов, обусловленные многостадийностью технологии, большим числом переменных, динамическим характером процессов, многокритериальностью результата, присущей сложным системам. Подчеркивается необходимость привлечения к исследованиям принципов «кибернетики химической технологии и ее методов анализа сложных систем, рассматриваемых на основе системного подхода». Здесь многостадийную, многопараметрическую сложную химико-технологическую систему предлагается рассматривать как совокупность отдельных самостоятельных простых блоков подсистем с определенными их входами, выходами, возмущениями и управляющими воздействиями. Одновременно с этим показывается, что изучение описания системы не может вестись по принципу простого сложения выделенных блоков. Показывается необходимость представления системы как целостного образования из иерархически организованного множества взаимосвязанных элементов с определенными соотношениями, связями между ними (создают качественно новые совокупные синергетические эффекты). Предполагается как автономность блоков, так и сбалансированность взаимосвязанных блоков. Качество материала определяется как совокупность свойств, обеспечивающая пригодность удовлетворять необходимые потребности в соответствии с назначением. Управление структурообразованием рассматривается как технологическое средство управления качеством.



В развитие указанного подхода в [3...5] материалы рассматриваются как системы с присущими им системными атрибутами и с учетом внутренней противоречивости и парадоксальности (рис. 1).



Рис.1. Противоречивость системного мышления при синтезе материалов

Познание системы как целостности невозможно без анализа ее частей (*парадокс целостности*). Возможные *способы* разбиения (декомпозиции) целостной системы указываются на рис.2.

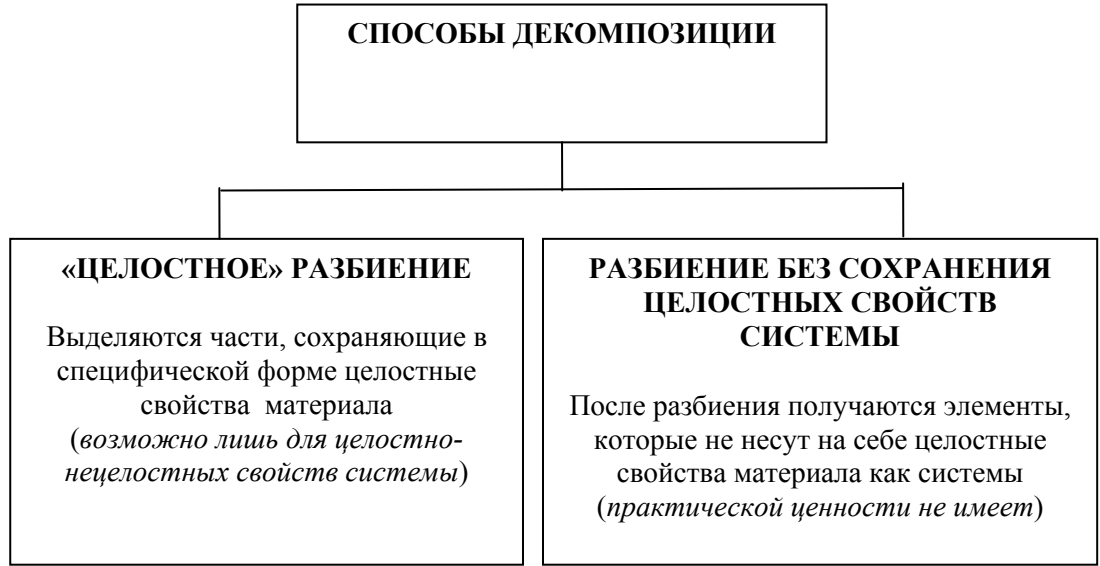


Рис.2. Способы декомпозиции

После разбиения целостной системы получаются элементы (части), которые *не несут на себе целостные свойства исходной системы* (такое разбиение практической ценности не имеет!). При разработке бетона (системы) естественным представляется разбиение системы на отдельные входящие в него компоненты. Однако такое представление системы не позволяет, изучая свойства компонентов (элементов), с необходимой достоверностью предсказать свойства всей системы. Такая декомпозиция практической ценности действительно не представляет. Указанное справедливо и при декомпозиции системы по масштабному структурному признаку (макро- и микроструктура, рассматриваемые в полиструктурной теории).

Выделяются такие части (элементарные образования), которые сохраняют в специфической форме целостные свойства исследуемой системы (условно это называется *«целостным» разбиением*). В качестве элементарного образования служит образец материала, свойства которого определяются как свойствами составляющих компонентов, так и присущими материалу (системе) интегративными свойствами. Откуда следует, что *без целостного системного подхода невозможно изучение материала с целью прогноза возможности его практической эксплуатации*. Однако даже интегративное свойство системы (как часть структуры) на качественном уровне может изучаться по существу вне системы. Так, например, смачиваемость поверхности заполнителя вяжущим может быть определена в отдельном эксперименте. При этом полученные результаты могут служить лишь качественным описанием процесса смачивания и не позволяют осуществить целостное описание системы, так как в системе смачивание протекает в стесненных условиях с дополнительным влиянием распределения компонентов и границ раздела фаз. *Используемый элемент декомпозиции не позволяет последующее агрегирование системы*.

*Целостное свойство* системы принадлежит рассматриваемой системе в целом, но не принадлежит ее составным элементам. Рассмотрим композиты (системы) на основе цемента. Компоненты: цемент, заполнители (дисперсные фазы), добавки, вода; без воды нет бетонной смеси; в процессе эволюции она превращается в бетон (система). Их можно рассматривать как элементы системы. Свойства системы, например прочность, эксплуатационная стойкость, определяющие систему в целом, не принадлежат ее отдельным элементам (компонентам).

*Нецелостное свойство* системы принадлежит составным элементам, но не принадлежит системе в целом. Элементы системы (компоненты композита) обладают свойствами, которыми система не обладает. Например, цемент (элемент) как минеральное вяжущее имеет определенную дисперсность. В бетоне (системе) цемент образует цементный камень, равномерно распределенный в объеме композита (система не обладает свойствами составных элементов).

Если свойство принадлежит как системе в целом, так и его составным элементам, оно рассматривается как *целостно-нецелостное*. Прочность и деформативность бетона (системы) зависят от прочности и деформативности заполнителя (элемента).

Если свойство не принадлежит ни системе в целом, ни его элементам, оно рассматривается как *«небытийное»*.

Таким образом, *целостное разбиение систем возможно лишь при наличии целостно-нецелостного свойства системы*.

Отличительной особенностью композиционных материалов от механической смеси компонентов (свойства которой определяются как сумма свойств компонентов) является наличие границы раздела фаз, определяющей интенсивность процессов структурообразования и свойства материала (системы). На границе раздела фаз формируется контактный слой, обеспечивающий сцепление компонентов (адгезионную прочность – *новое интегративное свойство*, которым не обладают входящие в систему элементы) и свойства материала. Объединение компонентов приводит к образованию на границе раздела фаз слоев с измененными свойствами (сольватный слой), оказывающими влияние на процессы формирования свойств системы, отличных от характеристик компонентов (например, процессы твердения цемента в большом объеме отличаются от процессов в тонких слоях на границе раздела фаз).

Как видим, при изучении композиционных материалов налицо наличие парадокса целостности. С одной стороны, оценку и анализ материалов можно производить лишь на основе рассмотрения материала как целостной и единой системы; с другой стороны – изучения материала невозможно без анализа ее частей. Именно поэтому исследования структуры и свойств материала осуществляются на основе изготовления опытных образцов и изучения межэлементных связей при сохранении целостности системы (например, так изучаются кинетические процессы формирования физико-механических характеристик материала).

Очевидно, при изучении композиционных материалов присутствует и парадокс иерархичности: *описание системы возможно только при наличии ее описания как элемента надсистемы (более широкой системы), и обратно, описание системы как элемента надсистемы возможно только при наличии описания данной системы.*

При разработке прогрессивных технологий производства материалов, экспериментально-статистических моделей разного уровня и определении их связи с технологией композитов, оптимизации материалов и конструкций широко использовались результаты обсуждений на международных семинарах по моделированию и оптимизации композитов (рук. В.А.Вознесенский [5]).

Ряд частных перспективных моделей композиционных материалов, в том числе когнитивных и логико-методологических, широко представлены в [6...11].

#### Список литературы

1. Чернышов, Е.М. Современное строительное материаловедение: эволюция методологий и фундаментальности научного знания / Е.М. Чернышов // Материалы Международной научно-практической конференции-семинара. – Волгоград: ВГАСУ, 2004. – С. 20–25.
2. Чернышов, Е.М. Концепция, проблематика и структура современной системы управления качеством в производстве строительных материалов и изделий / Е.М. Чернышов // Известия КГАСУ. – 2005. – № 2 (4). – С.11–14.
3. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.55–58.
4. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
5. Выровой, В.Н. Структура, свойства, состояния / В.Н. Выровой, А.Н. Герега // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Вип. № 27. – Одеса: Зовнішрекамсервіс, 2007. – С.78–84.
6. Воробьев, В.А. Основные задачи компьютерного материаловедения строительных композитов / В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.19–21.
7. Альбакасов, А.И. Моделирование свойств и синтез серных композиционных материалов / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 2. – С. 24–32.
8. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
9. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.Danilov, I. Garkina. // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, №. 5. – P.219–225. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>.
10. Будылина, Е.А. Синтез композитов: логико-методологические модели / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Д.С. Сорокин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 149.
11. Данилов, А.М. Гомеостатическая концепция моделирования систем в строительном материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Д.С. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 24–30.

#### References

1. Chernyshov, E.M. Modern building materials technology: the evolution of methodologies and basic scientific knowledge materialy / E.M. Chernyshov // International scientific and practical conference-seminar. – Volgograd: VGASU, 2004. – P. 20–25.
2. Chernyshov E.M. The concept and structure of the problems of modern quality management system in the production of building materials and products / E.M. Chernyshov // News KGASU. – 2005. – № 2 (4). – P.11–14.
3. Garkina, I.A. Building materials as systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2006. – № 7. – P.55–58.
4. Bazhenov, Y.M. System analysis in building materials: monograph / Y.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MSUCE Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
5. Vyrovoy, V.N. Structure, properties, condition / V.N. Vyrovoy, A.N. Gerega // Bisnik Odeska derzhavnoi akademii budivnitsva that arhitekturi, VIP. – № 27. – Odes: Zovnishrekamservic, 2007. – P.78–84.
6. Vorobyov, V.A. The main objectives of computer-materialovedeniya building composites / V.A. Vorobyov, A.V. Ilyukhin // Building materials. – 2006. – № 7. – P.19–21.
7. Albakasov, A.I. Modelling of the properties and synthesis of sulfur composites / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // News of higher educational institutions. Building. – 2012. – № 2. – P. 24–32.
8. Garkina, I.A. Management of quality materials with special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control. – 2008. – № 6. – P. 67–74.
9. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – Vol. 8, 2015. – №. 5. – P.219–225. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>.
10. Budylin, E.A. Synthesis of composites: logical and methodological model / E.A. Budylin, I.A. Garkina, A.M. Danilov, D.S. Sorokin // Modern problems of science and education. – 2014. – № 5. – P. 149.
11. Danilov, A.M. Homeostatic concept of modeling systems in building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina, D.S. Sorokin // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 4. – P. 24–30.

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

**Калашников Владимир Иванович**,  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Технологии строительных материалов  
и деревообработки»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Камбург Владимир Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: Kamburg@rambler.ru

**Суздальцев Олег Владимирович**,  
инженер-исследователь НИС,  
аспирант кафедры «Технологии  
строительных материалов  
и деревообработки»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Бодажков Никита Юрьевич**,  
аспирант кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: Npo-org@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

**Kalashnikov Vladimir Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Technology of building materials  
and wood processing»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Kamburg Vladimir Grigoryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Computer information systems»  
E-mail: Kamburg@rambler.ru

**Suzdal'tzev Oleg Vladimirovich**,  
Research engineer SRS,  
Postgraduate of the department «Technology  
of building materials and wood processing»  
E-mail: techbeton@pguas.ru

**Bodazhkov Nikita Yurievich**,  
Postgraduate of the department «Computer  
information systems»  
E-mail: Npo-org@yandex.ru

## ОЦЕНКА РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ БЕТОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В.И. Калашников, В.Г. Камбург, О.В. Суздальцев, Н.Ю. Бодажков

Рассматриваются самоуплотняющиеся многокомпонентные высокоэкономичные энерго- и ресурсосберегающие порошково-активированные бетоны нового поколения, реотехнологические свойства бетонных смесей, методы их оценки, корреляция растекаемости бетонных смесей из геометрически подобных конусов. Физико-математическим моделированием устанавливаются обоснованные соотношения и функциональные зависимости реотехнологических показателей, обладающие прогнозирующей способностью, а также уменьшающие трудоемкость и затраты материалов на экспериментальные работы при подборе составов бетонов.

*Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, состав, порошковая активация, реотехнологические свойства, распыл смеси, прочность, корреляция, физико-математическая модель, эмпирические уравнения*

## ASSESSMENT OF NEOTECHNOLOGIES PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIXES FOR CONCRETES OF NEW GENERATION

V.I. Kalashnikov, V.G. Kamburg, O.V. Suzdaltsev, N.Y. Bodazhkov

The authors discuss multi-component self-sealing high-efficiency energy – saving powder-activated concretes of a new generation, reotechnological properties of concrete mixtures, methods of their estimation, correlation of spreading test concrete mixes of geometrically similar cones. Physical-mathematical modeling are reasonable correlations and functional dependencies of reotechnological

metrics that have predictive capacity, as well as reducing the complexity and costs of materials for experimental work in the selection of the concrete.

*Keywords: self-compacting concrete, composition, activation powder, re technological properties, the blurring of the mixture, the strength of the correlation, physical-mathematical model, empirical equations*

Одним из приоритетных стратегических направлений в мировом производстве бетонов является разработка, исследование и внедрение высокоэкономичных, энергосберегающих и ресурсосберегающих бетонов нового поколения. Изготовление таких бетонов по отечественным технологиям формирует глобальную экономику в строительстве в любой стране, производящей значительное количество бетона для монолитного строительства и для сборных железобетонных изделий и конструкций.

Бетон является наиболее материалоемким продуктом в мире, превышающим по объемам производства (около 18 млрд т) объемы продуктов почти в любой отдельно взятой отрасли производства. Выпускаемый с 1840 до 1970 гг. 4-компонентный бетон старого поколения по рецептуре включал три сухих компонента – цемент, песок, щебень, а также воду. И лишь с 1970 г. в бетонные смеси начали добавлять пятый компонент – высокоэффективный суперпластификатор-разжижитель (изобретение 1969-1970 гг.). Эти бетоны мы называем бетонами переходного поколения с неизменной рецептурой сухих компонентов и с прочностью 40-50 МПа (марок М400-500). Их выпуск в России составляет 97-98 % от всех объемов производства бетонов.

За рубежом в последние 15-20 лет стремительно развивается производство экономичных самоуплотняющихся бетонов (Self-Compacting Concrete, Die selbstdichtenden Beton) нового поколения общестроительного назначения с прочностью до 50 МПа и высокоэкономичных, высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов с прочностью от 100 до 200 МПа. В Евросоюзе более 60 % всех бетонов выпускается из саморастекающихся, самонивелирующихся, самоуплотняющихся бетонных смесей. Эти бетоны за рубежом характеризуются как «путь в будущее» в связи со снижением энергозатрат в 1,5-1,6 раза [1]. Из высокопрочных бетонов осуществляется не только малоэтажное строительство, но и строительство уникальных высотных зданий и большепролетных сооружений, строительство платформ на морских шельфах для добычи газа и нефти и др. Благодаря особым реологическим свойствам СУБ открывает дорогу экологическим ресурсо- и энергосберегающим инновационным технологиям бетонирования.

Области использования сверхвысокопрочного самоуплотняющегося бетона распространяются за рубежом на область машиностроения, в частности, при изготовлении бурильных коронок с добавлением в бетон небольшого количества зернистого корунда [2]. Из сверхвысокопрочного бетона изготавливают станины металлообрабатывающих сверлильных, токарных и фрезерных станков и не столько из-за уменьшения стоимости по сравнению со стальными станинами, а вследствие значительного повышения точности обработки деталей [3].

Россия существенно отстает от передовых стран в стратегии практического применения самоуплотняющихся бетонов нового поколения. И это отставание увеличивается с каждым годом. Кафедра «Технологии бетонов, керамики и вяжущих» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (в настоящее время объединенная кафедра «Технологии строительных материалов и деревообработки») занимается разработкой, исследованиями и внедрением высокоэффективных порошково-активированных бетонов нового поколения с 2003 г. и находится по разработкам таких бетонов в России в числе ведущих [4, 5]. Получены бетоны общестроительного назначения с прочностью до 50 МПа, с повышенной прочностью до 100 МПа, а также бетоны и фибробетоны сверхвысокой прочности до 180-220 МПа (уровень стали). Отдельные разработки кафедры использованы в практике строительства в Москве, Красноярске, Ульяновске и Пензе.

Таким образом, самоуплотняющиеся порошковые и порошково-активированные (песчаные и щебеночные) бетонные смеси должны иметь низкие предел текучести  $\tau_0 = 5-40$  МПа и пластическую вязкость  $\eta = 10-50$  Па·с. Но для заводских лабораторий

важны не фундаментальные реологические показатели, а инженерные – реотехнологические. Для тестирования последних показателей на предприятиях ДСК и ЖБИ Евросоюза имеется целый ряд методик, регламентированных стандартом EN 12350. В отечественной практике используются лишь два реотехнологических показателя: распыл цементной суспензии и порошково-активированного песчаного бетона из конуса Хегерманна (конус от встряхивающего столика), осадка бетонной смеси и диаметр распыла ее из усеченного стандартного конуса (диаметр нижнего основания – 20 см, диаметр верхнего основания – 10 см, высота конуса – 30 см). Для лабораторного подбора составов новых порошково-активированных бетонов, состоящих из 6-8 компонентов с различными комбинациями их, необходима многопараметрическая оптимизация. Для этого при использовании стандартного конуса с объемом 5,49 л необходимо приготовить и испытать более 100 литров (около 20 замесов) бетонной смеси для оценки лишь одной марки бетона. При определении реотехнологического показателя используют меньший геометрически подобный конус емкостью 1,1 л (диаметр нижнего основания – 10 см, верхнего – 5 см, высота конуса – 20 см).

Для того чтобы значительно уменьшить объемы изготавливаемых смесей установили корреляцию диаметров растекаемости смесей из малого конуса и конуса Хегерманна по значениям экспериментальных результатов (табл. 1). По этим результатам построена корреляционная кривая (рис. 1) на основании полученного эмпирического уравнения:

$$P_{\text{км}} = 1,629P_{\text{кх}} - 5,95, \quad (1)$$

где  $P_{\text{км}}$  – распыл из конуса малого, см;  $P_{\text{кх}}$  – распыл из конуса Хегерманна, см.

Т а б л и ц а 1

| Распыл конуса Хегерманна ( $V=374 \text{ см}^3$ ), см | 32   | 32   | 21   | 36   | 36,2 | 31,5 | 32,8 | 30 | 30,8 | 31,5 | 29,5 | 31,5 | 33 | 29,5 | 26   | 28,5 |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|
| Распыл малого конуса, ( $V=1007 \text{ см}^3$ ), см   | 46,5 | 46,4 | 29,5 | 52,5 | 52,8 | 46,3 | 49   | 43 | 44   | 45,5 | 40   | 47   | 49 | 40   | 37,8 | 40   |

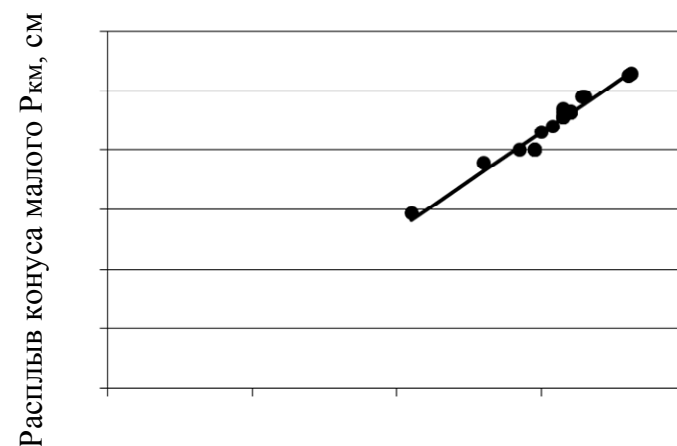


Рис. 1. Зависимость распыла смеси из малого конуса от распылов смеси из конуса Хегерманна

Как видно из рис. 1, зависимость значений распылов из малого конуса от распыла смеси из конуса Хегерманна является линейной, с коэффициентом корреляции, равным 0,95. Это свидетельствует о том, что законы реологии при течении малоструктурированных жидкостей с чрезвычайно низким пределом текучести действуют до определенных границ растекания. Уравнение справедливо при распыле бетонной смеси из малого конуса не менее 25-30 см.

В связи с тем, что в отечественных заводских лабораториях реотехнологические свойства бетонов оцениваются по осадке стандартного конуса ОК<sub>СТ</sub>, целесообразно в предварительном подборе составов смесей для уменьшения трудоемкости использовать малый конус.

Тогда пересчет осадки смеси из малого конуса (ОК<sub>М</sub>) в значение осадки стандартного конуса (ОК<sub>СТ</sub>) необходимо осуществлять по ранее установленной аналитической зависимости:

$$\text{ОК}_{\text{СТ}} = 0,64 + 1,36(\text{ОК}_{\text{М}}) - 0,00686(\text{ОК}_{\text{М}})^2. \quad (2)$$

Для обоснованного представления осадки смеси в виде математических соотношений по результатам осадки конуса ОК<sub>М</sub> необходимо выполнить физико-математическое моделирование [6, 7]. Мы отдаем себе отчет в том, что адекватность модели будет существенно зависеть от физико-технических, реологических свойств смеси и трения на подложке, на которой испытываются текучести бетонов, а также от остаточной и приобретаемой форм испытываемого образца. Однако в первом приближении ситуацию представим в виде образца – усеченного конуса ( $Mm'n'N$ ), распыла – в виде шарового сегмента, когда объем бетона, распыляющегося из конуса ( $mbcn$ ), принимает вид «опоясывающего» шарового сегмента ( $agb$  и  $ced$ ) (рис. 2), что может дать оценочные характеристики зависимости диаметра распыла смеси от ОК. Согласно схематичному осесимметричному вертикальному разрезу испытываемого образца в виде усеченного конуса, из закона сохранения материального баланса, получаем математическую модель в виде следующих уравнений и ограничений (3) и (4).

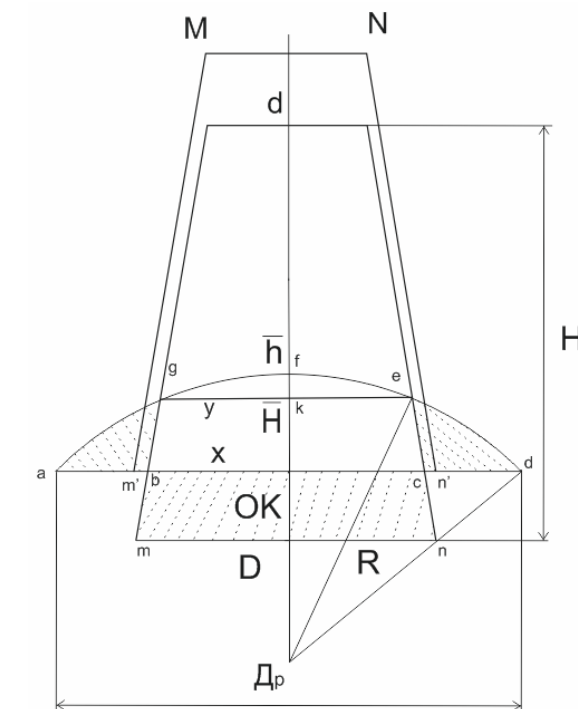


Рис.2. Модельная схема состояния распыла бетонной смеси из конуса

Условия сохранения материального баланса объемов:

$$Vr = V_s^I - V_s^{II} - Vo;$$

$$Vr = \frac{\pi}{3} \cdot OK \cdot (x^2 + xR_2 + R_2^2);$$

$$V_s^I = \frac{\pi}{3} \cdot (\bar{H} + \bar{h})^2 (3R - (\bar{H} + \bar{h})); \quad (3)$$

$$V_s^{II} = \frac{\pi}{3} \cdot \bar{h}^2 (3R - \bar{h});$$

$$Vo = \frac{\pi}{3} \cdot \bar{H} (x^2 + xy + y^2),$$

где  $Vr$  – объем усеченного конуса  $bmnc$ ;  $V_s^I$  – объем шарового сегмента  $adefg$ ;  $V_s^{II}$  – объем шарового сегмента  $gef$ ;  $Vo$  – объем усеченного конуса  $bceg$ .



Ограничения:

$$x = R_2 - \frac{OK \cdot (R_2 - R_1)}{H}; y = \sqrt{2R\bar{h} - \bar{h}^2}; Др = 2\sqrt{(\bar{H} + \bar{h})(2R - \bar{H} - \bar{h})};$$
$$0 \leq \bar{h} \leq \bar{H}; \bar{h} + \bar{H} \leq R; OK + \bar{h} + \bar{H} \leq H;$$
$$\sqrt{2 \cdot R \cdot \bar{h} - (\bar{h})^2} - x + \frac{\bar{H} \cdot (R_2 - R_1)}{H} = 0.$$

где  $R_1 = \frac{d}{2}$ ;  $R_2 = \frac{D}{2}$ ;  $D, d$  – нижнее и верхнее основания конуса; ОК – осадка конуса;  $\bar{H}$  – высота усеченного конуса *gecb*;  $\bar{h}$  – высота шарового сегмента *gef*;  $H$  – начальная высота конуса;  $R$  – радиус модельного шарового «опоясывающего» сегмента.

Обходя несложные, но громоздкие преобразования для нахождения точного решения системы (3)-(4), сводим ее к численному решению задачи квадратичного программирования  $\min (Vr - Vs^I + Vs^II + Vo)^2$  с ограничениями относительно неизвестных  $\bar{h}, \bar{H}, R$  в среде Mathcad с помощью функции Minimize. Начальные приближения выбирались из естественных геометрических соображений.

В результате расчетов были получены данные, приведенные в табл. 2, рис. 3.

Т а б л и ц а 2

Сравнительные результаты  
экспериментальных Дрэ и  
модельных Др значений

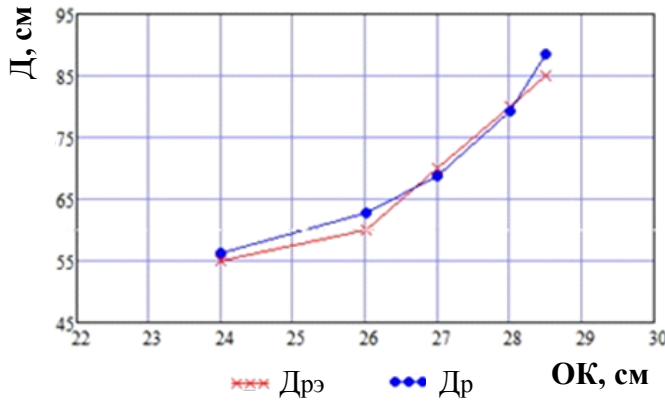


Рис.3. Зависимость Дрэ и Др от ОК

| ОК   | Дрэ | Др      |
|------|-----|---------|
| 17   | -   | 56,57   |
| 19   | -   | 57,313  |
| 21   | -   | 57,252  |
| 23   | -   | 57,425  |
| 24   | 55  | 56,141  |
| 25   | -   | 58,966  |
| 26   | 60  | 62,858  |
| 27   | 70  | 68,785  |
| 28   | 80  | 79,302  |
| 28,5 | 85  | 88,598  |
| 29   | -   | 104,776 |

Исходя из вида графика значений Др, рассчитанных по полученной модели (3)-(4), был выбран вид подгоночной функции и получена по МНК эмпирическая формула (5) со среднеквадратичными погрешностями:

- абсолютная погрешность – 0,2 %;
- относительная погрешность – 2,87 %;

$$Др = 0,00003112 \cdot e^{(0,517 \cdot ОК)} + 57,231.$$

Окончательная расчетная формула для  $Др^{расч}$  после введения поправочного множителя для отношения Дрэ / Др имеет следующий вид:

$$Др^{расч} = Др \cdot (1,113 + 0,015 \cdot ОК - 0,001068 \cdot (ОК)^2).$$

Выводы:

- предложены методики оценки реотехнологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей для изготовления высокопрочных, высокоэффективных бетонов нового поколения;
- предложены методы оценки осадки бетонных смесей и их растекаемости из усеченных конусов меньших размеров с целью снижения трудоемкости и значительного уменьшения расходов материалов при осуществлении предварительной многопараметрической оптимизации свойств многокомпонентных самоуплотняющихся бетонов;
- обоснована математическая модель, обладающая прогнозирующей способностью, и получены численные значения зависимостей диаметров расплыва бетонной смеси от осадки конуса с оценкой их адекватности.

Список литературы

1. Де Шуттер, Г. Самоуплотняющийся бетон – путь в будущее / Г. Де Шуттер // CPI Международное бетонное производство. – 2013. – №5. – С.40–45.  
2. Ибрук, Хурсит. Буровая коронка из сверхвысокопрочного бетона / Ибрук Хурсит // CPI Международное бетонное производство. – 2012. – №3. – С.28–30.  
3. Зигмайстер, Б. Применение сверхвысокотехнологичного бетона на основе специального вяжущего в области строительства и машиностроения / Б. Зигмайстер, Т. Дейзе // CPI Международное бетонное производство. – 2012. – №3. – С.26–32.  
4. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Ч. 3. От высокопрочных и особовысокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2008. – №3. – С. 20–23.  
5. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2012. – №2. – С. 10–12.  
6. Управление инвестиционно-строительным проектированием в жилищной сфере / В.Г. Камбург, И.В. Питак, В.Ф. Моисеев, О.Я. Питак // Региональная архитектура и строительство. – 2012. № 2. – С. 181–187.  
7. Оптимизация состава сухих строительных смесей с учетом их стоимости / В.И. Логанина, В.Г. Камбург, Л.В. Макарова, Н.Ю. Бодажков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 6 (666). – С. 44–50.

References

1. De Schutter, G. Self-compacting concrete – the way of the future / G. De Schutter // CPI Concrete plant international. – 2013. – No 5. – P.40–45.  
2. Ibruk, Hursit Boring bit of ultra high-strength concrete / Ibruk Hursit // CPI Concrete plant international. – 2012. – No 3. – P.28–30.  
3. Zigmeister, B. The use sverkhvysokochastotnogo concrete on the basis of a special binder in the field of construction and engineering / B. Zigmeister, T. Dayz // CPI Concrete plant international. – 2012. – No 3. – P.26–32.  
4. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology in the future of the concrete Part .3. from high strength concrete future to superplasticising concrete general purpose of the present / V.I. Kalashnikov // Concrete technology. – 2008. – No 3. – P. 20–23.  
5. Kalashnikov, V.I. What is a powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2012. – No. 2. – P. 10–12.  
6. The Management of investment and construction design in housing / V.G. Kamburg, I.V. Pitak, V.F. Moiseev, O.J. Pitak // Regional architecture and construction. – 2012. – No.2. – P. 181–187.  
7. Optimization of the dry building mixtures based on their value / V.I. Loganina, V.G. Kamburg, L.V. Makarova, N.Y. Bodazhkov // News of higher educational institutions. Construction. – 2014. – № 6 (666). – P. 44–50.



Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева

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

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

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

**Низин Дмитрий Рудольфович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: nizindi@yandex.ru

**Чернов Алексей Николаевич,**  
студент 5-го курса, специальность  
«Промышленное и гражданское  
строительство»  
E-mail: lhms@rambler.ru

Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev

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

**Nizina Tatyana Anatolevna,**  
Doctor of Science, Professor of the  
department «Building structures», Adviser of  
the Russian Academy Of Architecture and  
Construction Sciences  
E-mail: nizinata@yandex.ru

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

**Nizin Dmitry Rudolfovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: nizindi@yandex.ru

**Chernov Alexey Nikolaevich,**  
Student of 5th course, specialty «Industrial  
and civil construction»  
E-mail: lhms@rambler.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ЭКСПОНИРУЮЩИХСЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ\*

Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, А.Н. Чернов

Приведены результаты исследования колориметрических характеристик защитно-декоративных полимерных покрытий на основе эпоксидных связующих, экспонированных в условиях воздействия натуральных климатических факторов. Получены коэффициенты уравнений, описывающих изменение цветовых различий в зависимости от длительности экспонирования и актинометрических факторов. В работе использовались экспериментальные данные, полученные с помощью программного комплекса «Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий».

*Ключевые слова: защитно-декоративные покрытия, деградация, колориметрия, полное цветовое различие, различие в светлоте, различие в чистоте цвета, различие в цветовом тоне, насыщенность цвета, эпоксидные связующие*

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-97172.

## MODELLING OF INFLUENCE OF ACTINOMETRIC PARAMETERS ON OF DECORATIVE CHARACTERISTICS CHANGE OF EPOXY COMPOSITES, EXPOSED IN NATURAL CONDITIONS

T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, A.N. Chernov

The results of the research of colorimetric characteristics of protective and decorative polymer coatings based on epoxy binders, under the impact of natural climatic factors are shown. The coefficients of equations describing the change of color differences, depending on the duration of exposure and solar radiation factors are obtained. Experimental data obtained by using software «Statistical analysis of the color components of coatings» have been used in the work.

*Keywords: protective and decorative coatings, degradation, colorimetry, total color difference, the difference in lightness, the difference in the purity of the color, the difference in color tone, color saturation, epoxy binders*

Известно, что одним из существенных недостатков покрытий на основе полимерных связующих является их низкая стойкость к действию климатических факторов [1–6]. Процесс старения полимерных материалов в естественных условиях происходит при одновременном действии нескольких факторов: температуры воздуха, относительной влажности, кислорода и др. Различное сочетание этих факторов существенно зависит от климатической зоны, а их действие носит непостоянный характер в течение длительного времени эксплуатации. Однако их влияние на деструкцию полимера в значительной степени зависит от инициируемых солнечным светом фотохимических превращений. Именно поэтому считается, что преобладающими в процессе старения полимерных покрытий в природных условиях являются фотохимические реакции под действием УФ-составляющей солнечного света в интервале длин волн  $300 \div 400$  нм. Свет с меньшей длиной волны практически не доходит до поверхности Земли вследствие поглощения озоновым слоем, а видимый свет относительно слабо поглощается полимерами и обладает меньшей фотохимической активностью. Основная причина агрессивного влияния солнечного излучения заключается в том, что энергии ультрафиолетового света достаточно для разрушения многих, даже очень прочных связей в молекулах полимеров.

Помимо физико-механических свойств полимерных покрытий под действием климатических факторов изменяются и декоративные характеристики, существенное снижение которых, как правило, свидетельствует об интенсивном протекании деградационных процессов. Поэтому декоративные параметры полимерных композитов, оцениваемые по их внешнему виду, цвету и блеску, можно отнести к показателям качества защитно-декоративных покрытий, по изменению которых в процессе эксплуатации можно судить о скорости протекания процессов деградации.

На сегодняшний день существует три основных способа определения и описания цвета покрытия [7]:

- визуальное определение и соответствующее ему описание;
- сравнение с контрольным образцом (эталоном);
- количественное измерение и числовое выражение.

Визуальный способ описания цвета покрытия основан на таком физиологическом свойстве организма человека, как цветоощущение. Орган зрения человека – глаз – воспринимает как свет электромагнитные волны длиной  $380 \div 760$  нм [8]. Все видимые тела имеют определенный цвет, который зависит от того, какой по спектральному составу свет проходит через него и какие лучи спектра это тело поглощает. Человеческий глаз может различать до 300 оттенков ахроматического цвета от белого до черного и десятки тысяч хроматических цветов в различных сочетаниях. Количество цветных оттенков, воспринимаемых глазом, очень велико, однако большое значение в цветовосприятии имеет состояние нервной системы человека. Цветовое зрение может меняться от воздействия на организм различных раздражителей: слуховых, вкусовых, тепловых и др., в зависимости от эмоций, настроения человека. Кроме

того, существуют различные расстройства цветного зрения врожденного или приобретенного характера [8]. Каждый человек в той или иной мере по-своему воспринимает цвет какого-либо объекта, поэтому визуальное описание цвета является условным и напрямую зависит от цветоощущения исследователя.

Достаточно широкое распространение при определении цвета лакокрасочных покрытий получил метод сравнения испытываемых покрытий с эталонами, представленными в картотеках цветов. Каждому цвету соответствует определенный условный номер, обозначены колориметрические характеристики, определенные на основании замеров на краску образца при освещении его стандартным источником [7].

В ГОСТ 29319–92 «Материалы лакокрасочные. Метод визуального сравнения цвета» изложены требования, предъявляемые к экспертам, цвету его одежды и окружающих предметов, а также перечень тестов, которые он должен пройти для получения допуска к работе. Кроме того, при проведении исследований особое внимание должно уделяться характеристикам освещения и условиям осмотра, что создает дополнительные трудности и затрудняет широкое применение данного метода.

С учетом определенной условности и субъективности двух первых способов описания цвета, существенным образом зависящих от личных особенностей зрения исследователя, были разработаны методики, основанные на получении количественных измерений и числовых выражений цвета. Широкое распространение для количественного измерения цвета получила колориметрическая система, утвержденная Международной осветительной комиссией (МОК) в 1931 году [7]. При одинаковых значениях доминирующей длины волны, чистоты цвета и коэффициента яркости или отражения покрытия должны иметь один и тот же цвет. Однако установлено, что между цветовым ощущением человека и спектральным составом цвета нет прямой связи. Исследования цвета лакокрасочных покрытий показали, что данные цветовые характеристики не всегда дают правильное представление о его цветовом тоне, насыщенности и светлоте. Если расположить образцы в ряд по возрастанию длин волн, то оказывается, что они не воспроизводят равномерный ряд цветов покрытий, получаемый в результате визуального осмотра [7].

Для решения данной проблемы в последние годы все чаще предлагается использовать компьютерные технологии [9–13]. В основе предлагаемых подходов лежит возможность получения растрового изображения структуры материала при сканировании изучаемой поверхности, выражаемой в виде функции цвета. При цветном варианте сканирования, используя определенную цветовую модель, под которой подразумевается способ формального описания цвета на основе составляющих его компонентов, можно разложить каждый цвет на составляющие и спектры определенной частоты, анализ которых позволит получить объективные данные о декоративных характеристиках лакокрасочного покрытия.

Несмотря на схожесть подходов к оценке свойств лакокрасочных покрытий методом прямого сканирования поверхности образцов, для описания цвета применяются различные цветовые модели: Lab, RGB, HSB, CMYK и т.д. Проведенный анализ [2] используемых для описания цвета моделей (Lab, RGB, HSB, CMYK) показал, что защитные покрытия, используемые в строительстве, в том числе и пигментированные, так же как и краски, применяемые в полиграфии, отражают световое излучение и должны описываться субтрактивной моделью CMYK.

Активное внедрение для оценки цвета лакокрасочных покрытий компьютерных технологий позволяет не только установить соответствие цвета нанесенного покрытия эталону, но и проследить изменение декоративных характеристик под действием различных агрессивных факторов.

Для оценки изменения декоративных характеристик защитно-декоративных покрытий под действием агрессивных факторов был разработан программный комплекс «Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий» [14]; методика исследования приведена в работе [2]. Для реализации математической модели использовался язык программирования Borland Delphi 7, поддерживаемые опера-

ционные системы – Windows 2000/XP/7. Для оценки CMYK-составляющих (голубой, пурпурной, желтой и черной) и яркости используется цветовая палитра из 256 цветов.

В данной работе была поставлена цель – провести сравнение изменения колориметрических характеристик составов полимерных покрытий на основе эпоксидных связующих, экспонированных в условиях воздействия натуральных климатических факторов, на основе разработанного программного комплекса.

В качестве объектов исследования использовались составы защитно-декоративных покрытий на основе: эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587–84), модифицированной эпоксидной смолы Этал 247 (ТУ 2257-247-18826195–07), а также смолы ЭД-20 в сочетании с активным разбавителем эпоксидных смол Этал-1. Экспонирование образцов в натуральных климатических условиях проводилось на открытой площадке (сектор натуральных испытаний строительных материалов и конструкций) эколого-метеорологической лаборатории ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» в течение 14 месяцев с 1.03.2014 по 30.04.2015 г. Для каждого из составов параллельно исследовалось по 5 образцов. Сканирование образцов выполнялось с помощью полноцветного планшетного сканера Epson Perfection V330 Photo с разрешением 2400 dpi. Размер сканируемого участка составлял 20×20 мм, что позволяло на каждом образце проводить анализ 1889<sup>2</sup> пикселей.

Количественное описание цветового различия по насыщенности выполнялось путем сравнения исследуемого состава с абсолютно белым, имеющим максимальную плотность распределения ( $f(x) = 100$ ) при  $X = 255$  [2]:

$$S_p = \frac{\sum_{i=0}^{255} (255 - X_{pi}) \cdot f(X_{pi})}{255 \cdot 100}, \quad (1)$$

где  $X_{pi}$  – уровень цветовой составляющей, изменяющийся от 0 до 255;  $f(X_{pi})$  – плотность распределения.

Цветовая насыщенность покрытия в целом по 4-м цветовым составляющим и яркости определялась по формуле

$$E_{CMYKH} = \sqrt{S_C^2 + S_M^2 + S_Y^2 + S_K^2 + S_H^2}, \quad (2)$$

где  $S_C$ ,  $S_M$ ,  $S_Y$ ,  $S_K$  и  $S_H$  – цветовое различие по насыщенности для голубой, пурпурной, желтой, черной составляющих и яркости.

Для оценки комплексного изменения цветовых характеристик полимерных композитов в процессе старения на основе данных, полученных с помощью метода прямого сканирования, использовались полное цветовое различие (с учетом яркости) и цветовое различие (без учета яркости), определяемые по формулам:

$$\Delta E_{CMYKH} = \sqrt{(\Delta S_C^t)^2 + (\Delta S_M^t)^2 + (\Delta S_Y^t)^2 + (\Delta S_K^t)^2 + (\Delta S_H^t)^2}, \quad (3)$$

$$\Delta E_{CMYK} = \sqrt{(\Delta S_C^t)^2 + (\Delta S_M^t)^2 + (\Delta S_Y^t)^2 + (\Delta S_K^t)^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta S_C$ ,  $\Delta S_M$ ,  $\Delta S_Y$ ,  $\Delta S_K$  и  $\Delta S_H$  – изменение цветового различия по насыщенности в процессе экспонирования соответственно для голубой, пурпурной, желтой, черной составляющих и яркости:

$$\Delta S_C^t = S_C^{t=0} - S_C^t; \quad \Delta S_M^t = S_M^{t=0} - S_M^t; \quad \Delta S_Y^t = S_Y^{t=0} - S_Y^t; \\ \Delta S_K^t = S_K^{t=0} - S_K^t; \quad \Delta S_H^t = S_H^{t=0} - S_H^t.$$

Графические зависимости, описывающие изменение декоративных характеристик эпоксидных композитов в зависимости от длительности экспонирования, представле-

ны на рис. 1. Анализ полученных данных показал, что наибольшей стабильностью цвета обладают составы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с содержанием разбавителя Этал-1 в количестве 0 и 10 % от массы связующего. Для состава на основе эпоксидного связующего Этал-247 наблюдается наибольшее изменение декоративных характеристик в процессе экспонирования в условиях воздействия природных климатических факторов.

Для оценки интенсивности воздействия солнечной радиации и ультрафиолетового излучения использовалась автоматическая станция контроля загрязнения атмосферного воздуха (АСК) с актинометрическим комплексом в составе, позволяющая проводить мониторинг метеорологических параметров и загрязняющих веществ в окружающем воздухе в круглосуточном режиме. Метеорологический комплекс, входящий в АСК, с частотой в 20 минут фиксирует изменение температуры, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, осадков и т.д. Единственный в Мордовии актинометрический комплекс позволяет измерять суммарную солнечную радиацию и ультрафиолетовое излучение (жесткий ультрафиолет 280-320 нм, мягкий ультрафиолет 320-400 нм), определение которых имеет особое значение для изучения эксплуатационной стойкости полимерных композиционных материалов.

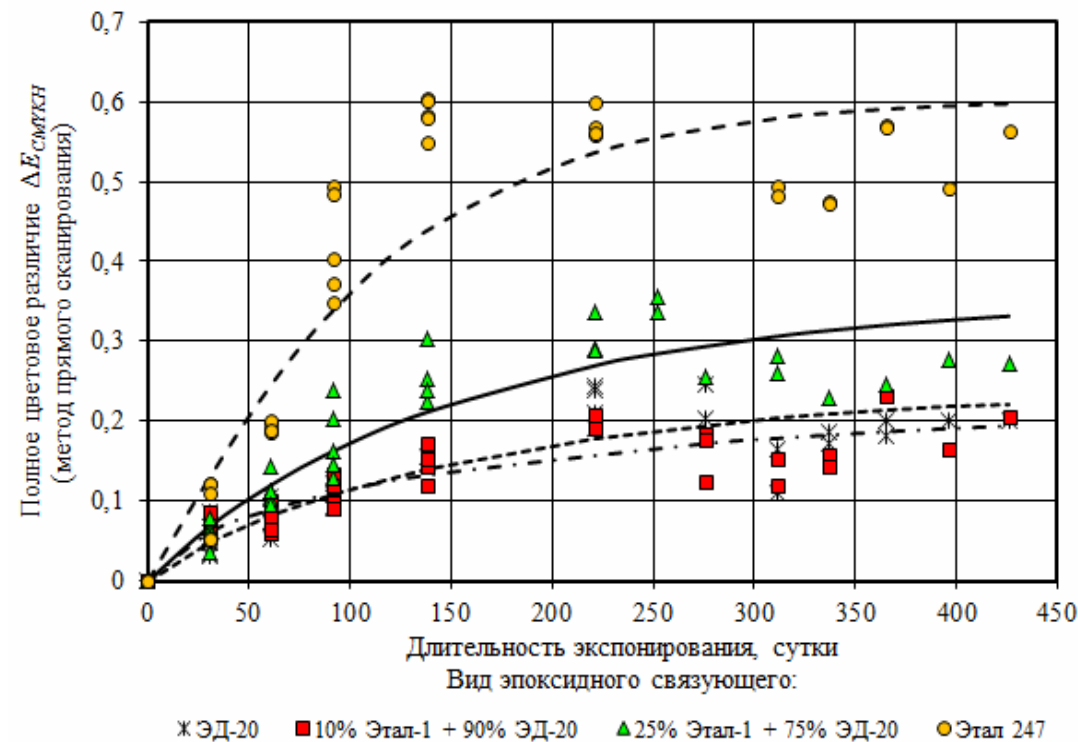


Рис. 1. Изменение полного цветового различия эпоксидных композитов в зависимости от длительности экспонирования в условиях воздействия климатических факторов

Учитывая существенное изменение интенсивности актинометрических параметров в зависимости от времени года (рис. 2), при построении математических моделей в качестве варьируемых факторов необходимо использовать не только длительность экспонирования, но и актинометрические параметры.

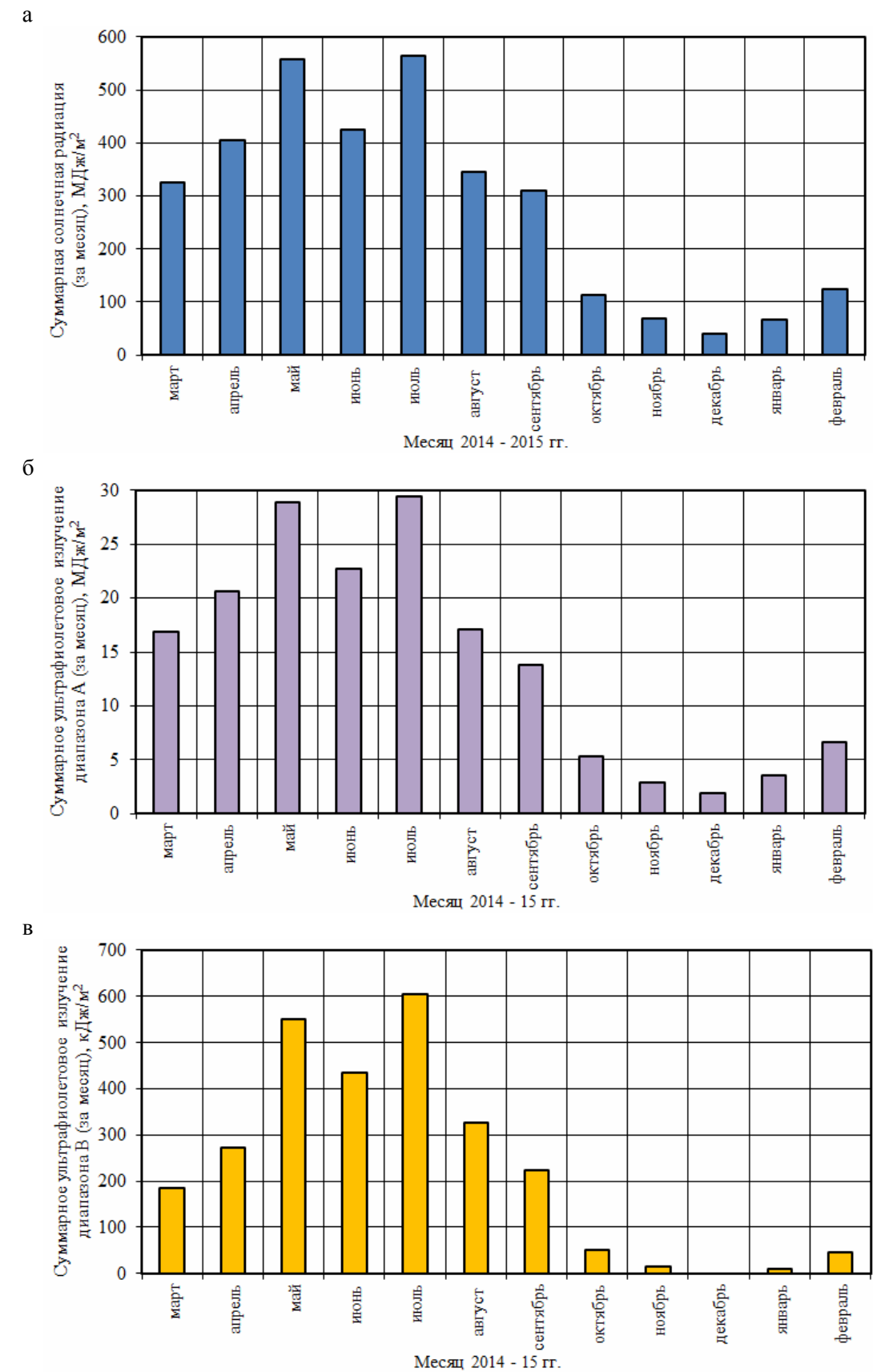


Рис. 2. Изменение актинометрических параметров в зависимости от месяца года:  
а – суммарная солнечная радиация; б – суммарное ультрафиолетовое излучение диапазона А;  
в – суммарное ультрафиолетовое излучение диапазона В

Графические кривые, описывающие изменение цветовых различий  $\Delta E_{\text{СМУКН}}$  и  $\Delta E_{\text{СМУК}}$  в зависимости от суммарной дозы солнечной радиации, приведены на рис. 3. Для описания полученных экспериментальных данных использовалась экспоненциальная зависимость

$$\Delta E_t = \Delta E_{\text{max}} \left(1 - \exp(-\alpha \cdot X^\beta)\right), \tag{5}$$

где  $\Delta E_{\text{max}}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты уравнения, зависящие от состава исследуемого композита;  $X$  – переменный фактор, отождествляемый в зависимости от вида анализируемых кривых с длительностью экспонирования ( $t$ , сутки), суммарной солнечной радиацией ( $Q$ , МДж/м<sup>2</sup>) или суммарным ультрафиолетовым излучением диапазона А ( $U_A$ , МДж/м<sup>2</sup>), В ( $U_B$ , кДж/м<sup>2</sup>).

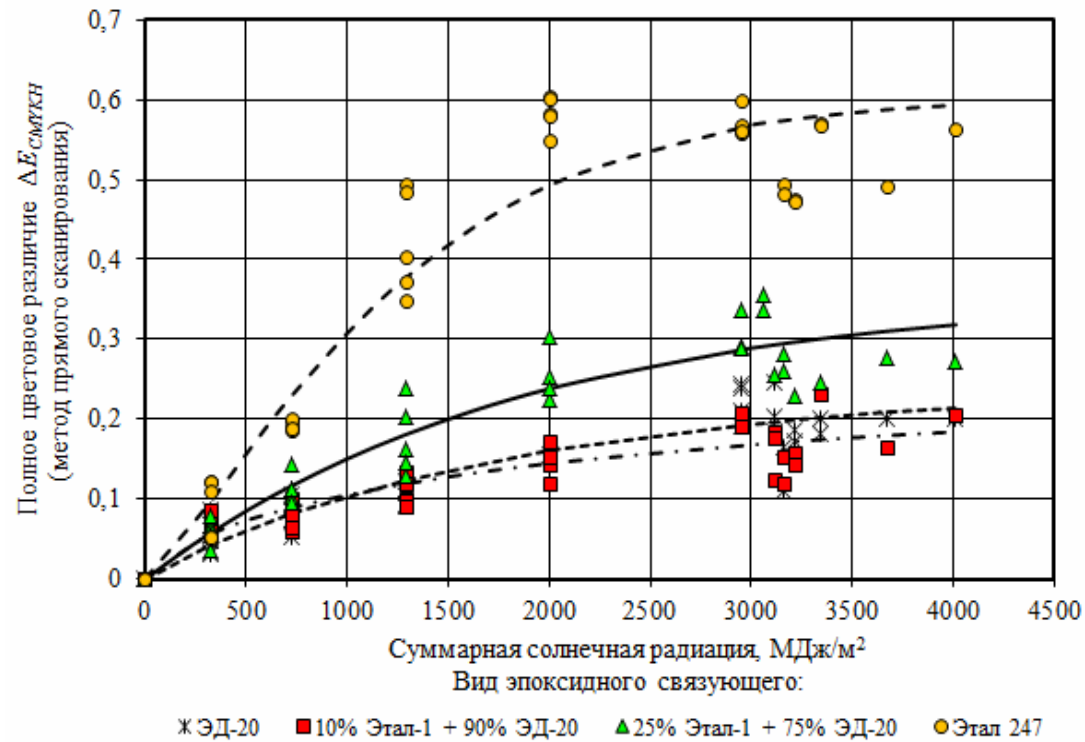


Рис. 3. Изменение полного цветового различия эпоксидных композитов в зависимости от суммарной солнечной радиации при экспонировании в условиях воздействия климатических факторов

Числовые значения коэффициентов уравнения (5), описывающего влияние актинометрических параметров и длительности экспонирования в натуральных условиях на декоративные характеристики эпоксидных композитов, приведены в таблице. Полученные значения коэффициентов детерминации для всех исследуемых составов превышают 0,95, что свидетельствует о достаточно надежной оценке получаемых результатов.

Значения коэффициентов уравнения (5), описывающего влияние актинометрических параметров и длительности экспонирования в натуральных условиях на декоративные характеристики эпоксидных композитов

| Вид<br>эпоксидного<br>связующего            | Коэффициенты<br>уравнения | Значения коэффициентов уравнения (5)<br>в зависимости от варьируемых факторов |        |       |        |
|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|
|                                             |                           | $t$                                                                           | $Q$    | $U_A$ | $U_B$  |
| Полное цветовое различие (с учетом яркости) |                           |                                                                               |        |       |        |
| ЭД-20                                       | $\alpha$                  | 94,8                                                                          | 1248,2 | 78,1  | 353,9  |
|                                             | $\beta$                   | 0,887                                                                         | 0,943  | 0,951 | 0,803  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,247                                                                         | 0,235  | 0,247 | 0,235  |
|                                             | $R^2$                     | 0,954                                                                         | 0,959  | 0,959 | 0,959  |
| 10 % Этал-1 +<br>90 % ЭД-20                 | $\alpha$                  | 33,1                                                                          | 197,2  | 25,9  | 75,4   |
|                                             | $\beta$                   | 0,676                                                                         | 0,692  | 0,697 | 0,582  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,233                                                                         | 0,198  | 0,233 | 0,198  |
|                                             | $R^2$                     | 0,956                                                                         | 0,959  | 0,959 | 0,959  |
| 25 % Этал-1 +<br>75 % ЭД-20                 | $\alpha$                  | 123,6                                                                         | 1938,1 | 100,3 | 502,3  |
|                                             | $\beta$                   | 0,955                                                                         | 1,008  | 1,016 | 0,856  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,358                                                                         | 0,357  | 0,358 | 0,357  |
|                                             | $R^2$                     | 0,971                                                                         | 0,977  | 0,977 | 0,978  |
| Этал 247                                    | $\alpha$                  | 185,7                                                                         | 7811,5 | 203,0 | 1663,2 |
|                                             | $\beta$                   | 1,113                                                                         | 1,248  | 1,262 | 1,078  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,604                                                                         | 0,522  | 0,604 | 0,522  |
|                                             | $R^2$                     | 0,986                                                                         | 0,990  | 0,990 | 0,991  |
| Цветовое различие (без учета яркости)       |                           |                                                                               |        |       |        |
| ЭД-20                                       | $\alpha$                  | 84,2                                                                          | 1029,9 | 70,9  | 305,9  |
|                                             | $\beta$                   | 0,853                                                                         | 0,911  | 0,919 | 0,776  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,247                                                                         | 0,235  | 0,247 | 0,235  |
|                                             | $R^2$                     | 0,951                                                                         | 0,957  | 0,957 | 0,957  |
| 10 % Этал-1 +<br>90 % ЭД-20                 | $\alpha$                  | 27,9                                                                          | 174,1  | 22,6  | 66,7   |
|                                             | $\beta$                   | 0,671                                                                         | 0,695  | 0,700 | 0,586  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,233                                                                         | 0,198  | 0,233 | 0,198  |
|                                             | $R^2$                     | 0,958                                                                         | 0,958  | 0,958 | 0,958  |
| 25 % Этал-1 +<br>75 % ЭД-20                 | $\alpha$                  | 92,8                                                                          | 1089,9 | 76,2  | 320,8  |
|                                             | $\beta$                   | 0,859                                                                         | 0,905  | 0,912 | 0,768  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,358                                                                         | 0,357  | 0,358 | 0,357  |
|                                             | $R^2$                     | 0,964                                                                         | 0,971  | 0,971 | 0,972  |
| Этал 247                                    | $\alpha$                  | 168,9                                                                         | 6627,2 | 177,4 | 1405,4 |
|                                             | $\beta$                   | 1,111                                                                         | 1,237  | 1,250 | 1,066  |
|                                             | $\Delta E_{\max}$         | 0,604                                                                         | 0,522  | 0,604 | 0,522  |
|                                             | $R^2$                     | 0,986                                                                         | 0,990  | 0,990 | 0,991  |

С момента разработки ПК «Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий» были проведены многочисленные исследования изменения цветовой насыщенности защитных покрытий на основе акриловых, эпоксидных, уретановых, эпоксиуретановых и других видов связующих. Экспериментально подтверждено, что получение достоверной информации о декоративных характеристиках



защитно-декоративных покрытий возможно лишь на основе статистического анализа результатов экспериментальных исследований. Разработанный программный комплекс и методика оценки изменения показателей качества поверхности защитно-декоративных покрытий рекомендуется к использованию при изучении влияния агрессивных факторов на декоративные характеристики строительных композитов, в том числе с учетом влияния интенсивности актинометрических параметров.

#### Список литературы

1. Павлов, И.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях / И.Н. Павлов. – М.: Химия, 1982. – 220 с.
2. Низина, Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих / Т.А. Низина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
3. Селяев, В.П. Оценка изменения декоративных свойств защитных покрытий под действием УФ-облучения / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Ю.А. Ланкина // Вестник Мордовского ун-та. – 2008. – № 4. – С. 128–133.
4. Результаты натурных испытаний полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих / Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов, А.Н. Чернов, Т.А. Низина // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-naturnykh-ispytaniy-polimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-ehpoksidnykh-svyazuyushhikh>.
5. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С. 34–42.
6. Кириллов, В.Н. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения / В.Н. Кириллов, О.В. Старцев, В.А. Ефимов // Авиационные материалы и технологии: юбил. науч.-техн. сб. (прил. к журн. «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. – С. 412–423.
7. Карякина, М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
8. Архангельский, В.Н. Глазные болезни / В.Н. Архангельский. – М.: Медицина, 1969. – 344 с.
9. Фролкин, О.А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук / О.А. Фролкин. – Саранск, 2000. – 223 с.
10. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина [и др.] // Лакокрасоч. материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
11. Селяев, В.П. Использование метода прямого сканирования для оценки изменения цветовых характеристик лакокрасочного покрытия под действием климатических факторов / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Н.О. Зубанкова // Вестник отделения строительных наук. – М., 2004. – Вып. 8. – С. 355–361.
12. Селяев, В.П. Методика обобщенной оценки декоративных характеристик лакокрасочных покрытий на основе компьютерных технологий / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Н.О. Зубанкова // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – № 6. – С. 40–45.
13. Селяев, В.П. Метод компьютерного экспресс-анализа декоративных характеристик защитных покрытий / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Е.А. Егунова // Вестник МГСУ. – 2012. – №1. – С. 153–158.
14. Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Н.О. Зубанкова, Ю.А. Ланкина // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610820 от 28.02.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613472 от 29.12.2005 г.

#### References

1. Pavlov, I.N. Plastics aging in natural and artificial conditions / I.N. Pavlov. – M.: Chemistry, 1982. – 220 p.
2. Nizina, T.A. Protective and decorative coatings based on epoxy and acrylic resins / T.A. Nizina. – Saransk: Mordovian University Press, 2007. – 258 p.
3. Selyaev, V.P. Assessment of changes in properties of decorative coatings under UV irradiation / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, Y.A. Lankina // Bulletin of Mordovia University. – 2008. – № 4. – P. 128–133.
4. The results of field tests of polymer composite materials based on epoxy resins / D.R. Nizin, D.A. Artamonov, A.N. Chernov, T.A. Nizina // Ogarev-online. Section «Engineering». – 2014. – Special Issue. – Mode of access: <http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-naturnykh-ispytaniy-polimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-ehpoksidnykh-svyazuyushhikh>.
5. Climatic resistant of polymeric composite materials based on epoxy resins / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, D.A. Artamonov // Regional architecture and construction. – 2015. – №1. – P. 34–42.
6. Kirillov, V.N. Weather resistance and defectiveness of polymer composite materials, problems and solutions / V.N. Kirillov, O.V. Startsev, V.A. Efimov // Aviation materials and technologies: a jubilee scientific-tech. collection (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»). – M.: VIAM, 2012. – P. 412–423.
7. Karjakina, M.I. Testing paintwork materials and coatings / M.I. Karjakina. – M.: Chemistry, 1988. – 272 p.
8. Arkhangelsky, V.N. Eye diseases / V.N. Arkhangelsky. – M.: Medicine, 1969. – 344 p.
9. Frolkin, O.A. Computer modeling and analysis of the structure of composite materials: dis. ... cand. tehn. sciences / O.A. Frolkin. – Saransk, 2000. – 223 p.
10. Evaluation of decorative properties of coatings / V.I. Loganina [et al.] // Paintwork materials and their application. – 2004. – № 8. – P. 10–12.
11. Selyaev, V.P. Using the method of direct scanning for evaluation the changes of paint coatings color characteristics under the influence of climatic factors / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, N.O. Zubankova // Bulletin of the Department of construction sciences. – Issue 8. – M., 2004. – P. 355–361.
12. Selyaev, V.P. Technique of generalized estimation of decorative characteristics of paint coatings based on of computer technologies / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, N.O. Zubankova // Proceedings of the universities. Building. – 2008. – №6. – P. 40–45.
13. Selyaev, V.P. Method of the computing rapid analysis of protective coatings decorative characteristics / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, E.A. Egunova // Bulletin of MSUCE, 2012. – №1. – P. 153–158.
14. Statistical analysis of the color components of coatings / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, N.O. Zubankova, Y.A. Lankina // Certificate of official registration of the computer program № 2006610820 from 28.02.2006 in Rospatent on application № 2005613472 from 29.12.2005.



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

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

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

**Тамбовцева Елена Александровна**,  
магистрант

Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, г. Саранск,  
ул. Большевикская, д. 68  
тел.: (8342) 48-25-64

**Ерофеев Владимир Трофимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные материалы  
и технологии»

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

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

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

**Tambovzeva Elena Aleksandrovna**,  
Undergraduate

Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.,  
tel.: (8342) 48-25-64

**Yerofeev Vladimir Trofymovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of  
department «Building materials and  
technology»

## РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО СТРУКТУРЫ И ВОЗРАСТА

И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Е.А. Тамбовцева

Проведенные исследования позволили получить уравнения регрессии, которые можно использовать как прогностические функции и по которым можно судить о динамике влияния плотности и возраста цементного камня на его свойства.

*Ключевые слова: прочность, модуль упругости, внутреннее трение, акустическая эмиссия, критический коэффициент интенсивности напряжений*

## REGRESSION DEPENDENCY OF BASIC PROPERTIES OF CEMENT STONE WITH CHANGE OF ITS STRUCTURE AND AGE

I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, E.A. Tambovzeva

The authors studies have yielded a regression equation that can be used as a predictive tool to judge about the dynamics of cement stone density and age influence on its properties.

*Keywords: strength, modulus of elasticity, internal friction, acoustic emission, critical stress intensity factor*

Многочисленными исследованиями показано, что цементный камень, или клей, являясь матричным компонентом структуры конструкционного бетона, предопределяет его механическое поведение как при силовом, так и при несиловом воздействии.

В этой связи для оценки качества цементного камня и бетона на его основе важна в первую очередь конструкционная прочность – как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности. Основными показателями конструкционной прочности в физико-механическом

аспекте являются пределы прочности, деформативности, трещиностойкости (вязкости разрушения) материала.

Создание конструкционных строительных материалов (КСМ) с определенными свойствами является важнейшей задачей современной науки о материалах [1], в основу решения которой положено описание связей эффективных свойств КСМ разных типов с характеристиками компонентов, которые можно получить только экспериментальным путем, и анализ особенностей механического поведения композитов как с позиций механики деформирования сплошной среды, так и с позиции структурной механики разрушения [2]. К сожалению, в отечественной литературе весьма ограничены публикации по изучению деформативных особенностей бетонов нового поколения на диаграмме нагружения, необходимые для анализа особенностей механического поведения конструкционных бетонов, и особенно современных высокопрочных высококачественных бетонов нового поколения (БНП), что сдерживает разработку нормативных документов по БНП и вызывает необходимость широких комплексных исследований по проблеме механики разрушения БНП.

Для комплексного изучения кинетики изменения предела прочности на осевое сжатие  $R_{сж}$  и растяжение при изгибе  $R_{ри}$ , динамического модуля упругости  $E_d$  и коэффициента внутреннего трения  $K_{вт}$ , критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c^*$ , генерации ультразвуковых импульсов акустической эмиссии на диаграмме нагружения и плотности  $\rho$  цементного камня в зависимости от водоцементного отношения и возраста был использован быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) марки 400 с нормальной густотой, равной 27–28 %. БТЦ содержал 15 % добавки из опоки. Минералогический состав БТЦ, %:  $C_3S$  – 54;  $C_2S$  – 20;  $C_3A$  – 9 и  $C_4AF$  – 13. Начало схватывания – 2 часа 10 минут, конец схватывания – 4 часа.

Оценку перечисленных выше параметров качества механических свойств цементного камня проводили по методикам ГОСТ 10180-90, ГОСТ 29167-91, и согласно инструкции прибора по измерению коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ-2 энергию акустической эмиссии при разрушении образцов оценивали по методике [3].

Было изготовлено пять серий образцов цементного камня размером 4×4×16 см с водоцементным отношением, равным 0,27; 0,32; 0,37; 0,42 и 0,47, то есть с водоцементным отношением в диапазоне от нормальной густоты (НГ) до 1,65 НГ, по И.Н. Ахвердову, то есть до максимальной водоудерживающей способности цементного теста. В каждой серии было изготовлено по 30 образцов.

После суточного хранения в формах над водой образцы распалубливали, взвешивали и помещали в воду при нормальной температуре на дальнейшее твердение.

Испытание образцов проводили в контрольные сроки в возрасте цементного камня 3, 14, 28, 60 и 90 суток. В каждый контрольный срок испытывали по шесть образцов каждой серии. С целью повышения достоверности получаемых результатов перечисленные характеристики качества цементного камня определяли на каждом образце.

Решение о хранении образцов в воде во время всего периода испытаний было принято с целью исключения влияния влажностных усадочных напряжений на контролируемые в эксперименте структурно-чувствительные параметры цементного камня.

В табл. 1 приведены численные значения характеристик качества цементного камня, полученные в наших опытах. По результатам этих значений построены графические зависимости, приведенные в табл. 2.

В табл. 2 представлены результаты исследований по определению аналитических и графических зависимостей основных характеристик качества цементного камня, а также значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии и коэффициентов корреляции этих уравнений в зависимости от его возраста  $\tau$  при постоянном значении его водоцементного отношения.

При этом особого внимания в табл. 1 заслуживает кинетика изменения двух параметров: коэффициента внутреннего трения  $K_{вт}$  и суммарной энергии акустической

эмиссии (АЭ)  $\Xi_{\text{АЭ}}$ , В<sup>2</sup>·см<sup>-2</sup>, выделившейся в процессе разрушения опытных образцов при определении критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c^*$ .

Т а б л и ц а 1

Численные значения характеристик качества цементного камня

| Возраст<br>цементного<br>камня, сут. | Характеристики цементного камня |                          |                          |                         |                                   |                 | $\Xi_{\text{АЭ}}$ ,<br>В <sup>2</sup> ·см <sup>-2</sup> |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|
|                                      | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup>   | $R_{\text{сж}}$ ,<br>МПа | $R_{\text{ри}}$ ,<br>МПа | $E_{\text{д}}$ ,<br>МПа | $K_c^*$ ,<br>МПа·м <sup>0,5</sup> | $K_{\text{вт}}$ |                                                         |
| 1                                    | 2                               | 3                        | 4                        | 5                       | 6                                 | 7               | 8                                                       |
| В/Ц = 0,27                           |                                 |                          |                          |                         |                                   |                 |                                                         |
| 1                                    | 2030                            | -                        | -                        | -                       | -                                 | -               | -                                                       |
| 3                                    | 2060                            | 41,1                     | 3,67                     | 8680                    | 0,360                             | 0,0274          | 0,08                                                    |
| 14                                   | 2060                            | 70,9                     | 4,94                     | 13930                   | 0,485                             | 0,0166          | 0,15                                                    |
| 28                                   | 2070                            | 80,4                     | 5,57                     | 15340                   | 0,547                             | 0,0144          | 0,175                                                   |
| 60                                   | 2080                            | 86,3                     | 6,43                     | 15550                   | 0,632                             | 0,0148          | 0,12                                                    |
| 90                                   | 2090                            | 91,2                     | 5,55                     | 15970                   | 0,545                             | 0,0148          | 0,11                                                    |
| В/Ц = 0,32                           |                                 |                          |                          |                         |                                   |                 |                                                         |
| 1                                    | 1990                            | -                        | -                        | -                       | -                                 | -               | -                                                       |
| 3                                    | 2010                            | 27,8                     | 2,8                      | 6850                    | 0,275                             | 0,0260          | 0,06                                                    |
| 14                                   | 2016                            | 53,9                     | 3,9                      | 12070                   | 0,384                             | 0,0175          | 0,145                                                   |
| 28                                   | 2023                            | 74,4                     | 4,87                     | 13850                   | 0,478                             | 0,0153          | 0,15                                                    |
| 60                                   | 2025                            | 77,9                     | 5,47                     | 14390                   | 0,537                             | 0,0150          | 0,12                                                    |
| 90                                   | 2030                            | 84,2                     | 4,8                      | 14260                   | 0,471                             | 0,0154          | 0,11                                                    |
| В/Ц = 0,37                           |                                 |                          |                          |                         |                                   |                 |                                                         |
| 1                                    | 1920                            | -                        | -                        | -                       | -                                 | -               | -                                                       |
| 3                                    | 1930                            | 19,5                     | 2,17                     | 5900                    | 0,213                             | 0,0316          | 0,04                                                    |
| 14                                   | 1960                            | 39,6                     | 3,74                     | 10340                   | 0,367                             | 0,0210          | 0,134                                                   |
| 28                                   | 1960                            | 57,0                     | 3,99                     | 11890                   | 0,391                             | 0,0166          | 0,14                                                    |
| 60                                   | 1965                            | 64,4                     | 4,38                     | 12900                   | 0,430                             | 0,0160          | 0,12                                                    |
| 90                                   | 1970                            | 67,0                     | 4,12                     | 12850                   | 0,405                             | 0,0163          | 0,11                                                    |
| В/Ц = 0,42                           |                                 |                          |                          |                         |                                   |                 |                                                         |
| 1                                    | 1810                            | -                        | -                        | -                       | -                                 | -               | -                                                       |
| 3                                    | 1840                            | 16,9                     | 1,58                     | 5240                    | 0,155                             | 0,0374          | 0,040                                                   |
| 14                                   | 1860                            | 33,6                     | 2,92                     | 8620                    | 0,287                             | 0,0231          | 0,120                                                   |
| 28                                   | 1860                            | 45,9                     | 3,28                     | 10050                   | 0,309                             | 0,0187          | 0,130                                                   |
| 60                                   | 1870                            | 52,3                     | 3,67                     | 11040                   | 0,360                             | 0,0177          | 0,1                                                     |
| 90                                   | 1875                            | 56,4                     | 3,6                      | 11110                   | 0,354                             | 0,0168          | 0,08                                                    |
| В/Ц = 0,47                           |                                 |                          |                          |                         |                                   |                 |                                                         |
| 1                                    | 1770                            | -                        | -                        | -                       | -                                 | -               | -                                                       |
| 3                                    | 1790                            | 15,5                     | 1,48                     | 5110                    | 0,145                             | 0,0398          | 0,035                                                   |
| 14                                   | 1810                            | 31,2                     | 2,83                     | 8170                    | 0,278                             | 0,0254          | 0,06                                                    |
| 28                                   | 1810                            | 36,5                     | 3,1                      | 9040                    | 0,305                             | 0,0200          | 0,06                                                    |
| 60                                   | 1810                            | 41,8                     | 3,18                     | 9390                    | 0,312                             | 0,0189          | 0,05                                                    |
| 90                                   | 1815                            | 45,2                     | 3,1                      | 9650                    | 0,305                             | 0,0190          | 0,04                                                    |

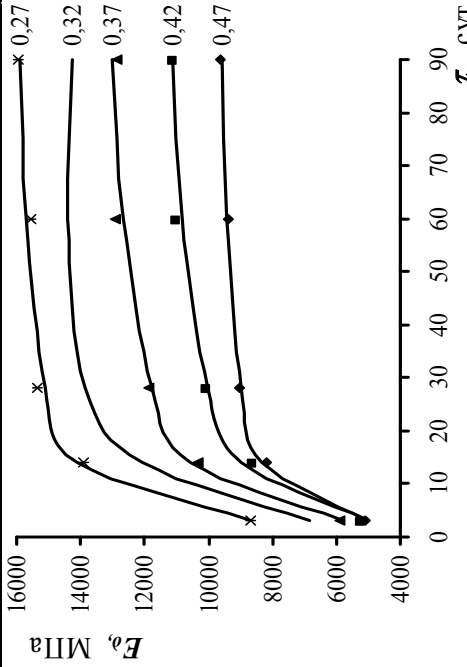
Как известно, внутренним трением твердого тела называется свойство этого тела необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную ему в процессе деформирования. Метод внутреннего трения является структурно-чувствительным методом изучения тонкого строения твердых тел. Для измерения внутреннего трения цементного камня использован прибор ИКВТ-2, в котором коэффициент внутреннего трения определяется с помощью резонансной характеристики, полученной при изгибных колебаниях опытного образца. Внутреннее трение есть функция, прежде всего, прочности и плотности фазовых компонентов в матричной дисперсной системе цементного камня.

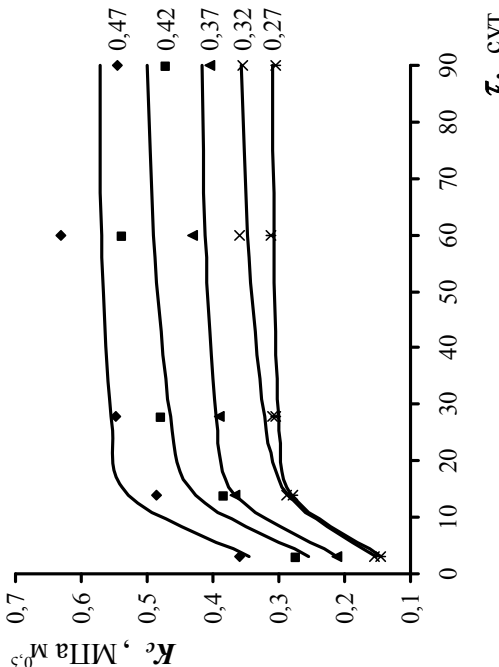
Т а б л и ц а 2

Аналитические и графические зависимости основных характеристик качества цементного теста

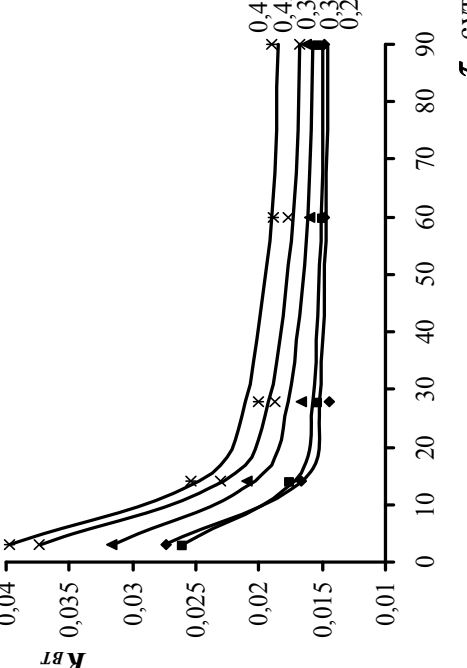
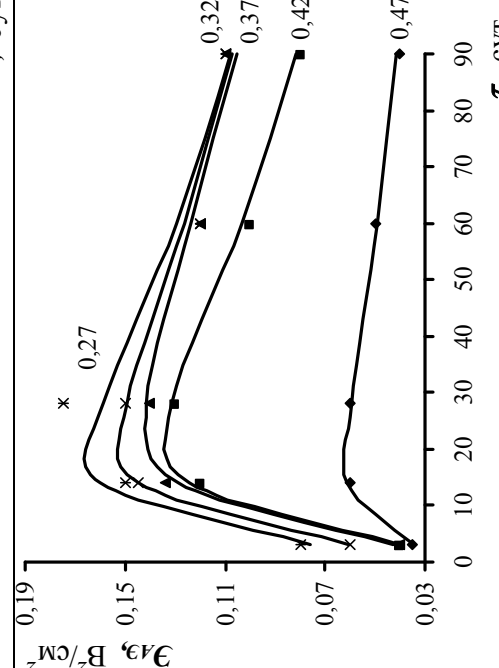
| Свойство цементного камня | Вид функции                                                     | $r$   | В/Ц  | Значения коэффициентов |       |        |       |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------|------|------------------------|-------|--------|-------|
|                           |                                                                 |       |      | $a$                    | $b$   | $c$    | $d$   |
| 1                         | 2                                                               | 3     | 4    | 5                      | 6     | 7      | 8     |
|                           |                                                                 |       |      | -31,12                 | 0,19  | 6,0    | 0,885 |
|                           |                                                                 |       |      | -32,51                 | 0,16  | 5,5    | 0,654 |
|                           |                                                                 |       |      | -4,81                  | 0,91  | 4,4    | 0,964 |
|                           |                                                                 |       |      | -8,43                  | 0,48  | 4,1    | 0,601 |
|                           |                                                                 |       |      | -1,06                  | 2,99  | 3,2    | 1,358 |
| 2                         | $R_{\text{сж}} = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$ | 0,945 | 0,27 | -326,7                 | 0,304 | 99,91  | 0,559 |
|                           |                                                                 |       |      | -129,2                 | 0,878 | 114,04 | 0,408 |
|                           |                                                                 |       |      | -47,9                  | 1,99  | 96,98  | 0,464 |
|                           |                                                                 |       |      | -108,8                 | 0,958 | 105,08 | 0,263 |
|                           |                                                                 |       |      | -91,4                  | 0,651 | 60,05  | 0,387 |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |
| 3                         | $R_{\text{сж}} = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$ | 0,947 | 0,32 | -                      | -     | -      | -     |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |
|                           |                                                                 |       |      | -                      | -     | -      | -     |

Продолжение табл. 2

| 1                                                                                   |  | 2                                                     | 3     | 4            | 5      | 6      | 7       | 8      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------|-------|--------------|--------|--------|---------|--------|
|  |  | $E_d = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$ | 0,995 | 0,27         | -44442 | 0,369  | 16420,6 | 0,843  |
|                                                                                     |  |                                                       |       | 0,32         | -16879 | 0,894  | 15100,1 | 0,852  |
|                                                                                     |  |                                                       |       | 0,37         | -34734 | 0,408  | 14259,2 | 0,612  |
|                                                                                     |  |                                                       |       | 0,42         | -46149 | 0,267  | 12432,1 | 0,550  |
|                                                                                     |  |                                                       |       | 0,47         | -32645 | 0,305  | 9989,3  | 0,763  |
|                                                                                     |  |                                                       |       | Возраст, сут |        | a      |         | b      |
|                                                                                     |  |                                                       | 0,994 | 3            |        | 138,30 |         | 3014,7 |
|                                                                                     |  |                                                       | 0,969 | 14           |        | 142,21 |         | 4120,9 |
|                                                                                     |  |                                                       | 0,989 | 28           |        | 139,71 |         | 3813,5 |
|                                                                                     |  |                                                       | 0,996 | 60           |        | 136,59 |         | 3838,4 |
|                                                                                     |  |                                                       | 0,982 | 90           |        | 129,88 |         | 3832,4 |

|                                                                                      |  |                                                         |       |              |        |        |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------|-------|--------------|--------|--------|--------|---------|
|  |  | $K_c^* = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$ | 0,997 | 0,27         | 0,0145 | 0,1992 | 0,0421 | -1,578  |
|                                                                                      |  |                                                         |       | 0,32         | 0,0148 | 0,1806 | 0,0356 | -1,415  |
|                                                                                      |  |                                                         |       | 0,37         | 0,0151 | 0,1530 | 0,0412 | -1,233  |
|                                                                                      |  |                                                         |       | 0,42         | 0,0159 | 0,1875 | 0,0520 | -1,185  |
|                                                                                      |  |                                                         |       | 0,47         | 0,0175 | 0,1730 | 0,054  | -1,95   |
|                                                                                      |  |                                                         |       | Возраст, сут |        | a      |        | b       |
|                                                                                      |  |                                                         | 1,000 | 3            |        | 0,0982 |        | -0,0001 |
|                                                                                      |  |                                                         | 1,000 | 14           |        | 0,0981 |        | -0,0004 |
|                                                                                      |  |                                                         | 0,997 | 28           |        | 0,1007 |        | -0,0130 |
|                                                                                      |  |                                                         | 1,000 | 60           |        | 0,0984 |        | -0,0012 |
|                                                                                      |  |                                                         | 1,000 | 90           |        | 0,0979 |        | -0,002  |

Окончание табл. 2

| 1                                                                                     | 2                                                                               | 3     | 4            | 5      | 6     | 7     | 8      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|--------|-------|-------|--------|
|  | $K_{ВТ} = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$                        | 0,994 | 0,27         | -0,806 | 0,681 | 0,578 | 1,110  |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,32         | -3,160 | 0,167 | 0,532 | 0,658  |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,37         | -0,496 | 0,863 | 0,428 | 0,948  |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,42         | -0,716 | 0,549 | 0,396 | 0,610  |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,47         | -0,103 | 3,040 | 0,313 | 1,360  |
|                                                                                       |                                                                                 |       | Возраст, сут |        |       |       | b      |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 3            |        |       |       | 0,0982 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 14           |        |       |       | 0,0981 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 28           |        |       |       | 0,1007 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 60           |        |       |       | 0,0984 |
|  | $\mathcal{E}_{АЭ} = \frac{a + b \cdot \tau}{1 + c \cdot \tau + d \cdot \tau^2}$ | 0,996 | 0,27         | -0,071 | 0,072 | 0,290 | 0,0040 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,32         | -0,051 | 0,051 | 0,218 | 0,0027 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,37         | -0,033 | 0,031 | 0,127 | 0,0017 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,42         | -0,024 | 0,025 | 0,084 | 0,0023 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 0,47         | -0,048 | 0,048 | 0,569 | 0,0063 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | Возраст, сут |        |       |       | b      |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 3            |        |       |       | 0,0982 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 14           |        |       |       | 0,0981 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 28           |        |       |       | 0,1007 |
|                                                                                       |                                                                                 |       | 60           |        |       |       | 0,0984 |

При изучении трещиностойкости цементного камня наибольший интерес представляют условия, при которых микротрещины, пустоты и неоднородности его структуры начинают расти и распространяться как макроскопические трещины. Для исследования этих особенностей кинетического процесса разрушения структуры цементного камня использован метод АЭ, основанный на регистрации упругих волн в килогерцевом диапазоне, испускаемых материалом и вызванных динамической локальной перестройкой его структуры в процессе нагружения и деформирования. Анализ изменения численных значений  $K_{вт}$  и  $\mathcal{E}_{АЭ}$  опытных образцов в рассматриваемом временном диапазоне структурообразования цементного камня свидетельствует о том, что эти методы отличаются высокой чувствительностью и разрешающей способностью, позволяющими оценивать как конструктивные, так и деструктивные процессы структурообразования цементного камня во времени.

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимости  $K_c^*$  от  $R_{рн}$  и  $E_d$  от  $R_{сж}$  в виде соответствующих уравнений регрессии.

Из анализа численных значений коэффициентов корреляции следует, что между рассматриваемыми величинами наблюдается достаточно тесная связь, а сами функции регрессии могут быть использованы как прогностические для оценки изменения характеристик качества цементного камня во времени.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить уравнения регрессии названных выше характеристик качества цементного камня от его водоцементного отношения (табл. 3), установить значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии для 3-, 14-, 28-, 60- и 90-суточного возраста цементного камня и определить численные значения эмпирических коэффициентов корреляции уравнений регрессии.

Т а б л и ц а 3

Значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии

| Свойство цементного камня                                              | Вид функции                                   | $r$   | Возраст, сут. | Значения коэффициентов |        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|---------------|------------------------|--------|-----|
|                                                                        |                                               |       |               | $a$                    | $b$    | $c$ |
| 1                                                                      | 2                                             | 3     | 4             | 5                      | 6      | 7   |
| Предел прочности при растяжении, МПа                                   | $R_{рн} = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$ | 0,992 | 3             | 0,38                   | -1,74  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 14            | 1,26                   | -1,03  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 28            | 1,31                   | -1,12  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 60            | 1,24                   | -1,27  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 90            | 1,48                   | -1,02  | -   |
| Предел прочности при сжатии, МПа                                       | $R_{сж} = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$ | 0,947 | 3             | 2,96                   | -1,99  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 14            | 8,38                   | -1,62  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 28            | 14,71                  | -1,34  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 60            | 18,50                  | -1,21  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 90            | 20,17                  | -1,18  | -   |
| Динамический модуль упругости, МПа                                     | $E_d = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$    | 0,991 | 3             | 2170,82                | -1,04  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 14            | 3743,04                | -1,01  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 28            | 4495,70                | -0,95  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 60            | 5288,28                | -0,85  | -   |
|                                                                        |                                               |       | 90            | 5251,50                | -0,86  | -   |
| Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup> | $K_c^* = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$  | 0,977 | 3             | 0,0373                 | -1,737 | -   |
|                                                                        |                                               |       | 14            | 0,1239                 | -1,032 | -   |
|                                                                        |                                               |       | 28            | 0,1267                 | -1,128 | -   |
|                                                                        |                                               |       | 60            | 0,1209                 | -1,275 | -   |
|                                                                        |                                               |       | 90            | 0,1457                 | -1,016 | -   |

О к о н ч а н и е т а б л . 3

| 1                                                             | 2                                                                                              | 3     | 4  | 5       | 6      | 7      |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----|---------|--------|--------|
| Коэффициент внутреннего трения                                | $K_{вт} = a + b \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right) + c \cdot \left(\frac{Ц}{B}\right)^2$           | 0,981 | 3  | -0,0307 | 0,1382 | 0,0015 |
|                                                               |                                                                                                |       | 14 | 0,0015  | 0,0501 | 0,0001 |
|                                                               |                                                                                                |       | 28 | -0,0013 | 0,0428 | 0,0003 |
|                                                               |                                                                                                |       | 60 | -0,0028 | 0,0421 | 0,0005 |
|                                                               |                                                                                                |       | 90 | 0,0002  | 0,0359 | 0,0004 |
| Энергия акустической эмиссии, В <sup>2</sup> /см <sup>2</sup> | $\mathcal{E}_{АЭ} = a + b \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right) + c \cdot \left(\frac{Ц}{B}\right)^2$ | 0,968 | 3  | -0,0563 | 0,1216 | 0,0076 |
|                                                               |                                                                                                |       | 14 | 0,6640  | -1,117 | -0,016 |
|                                                               |                                                                                                |       | 28 | 0,5926  | -1,001 | -0,011 |
|                                                               |                                                                                                |       | 60 | 0,6430  | -1,085 | -0,017 |
|                                                               |                                                                                                |       | 90 | 0,6158  | -1,064 | -0,016 |

Проверка значимости коэффициентов корреляции показала, что во всех рассматриваемых зависимостях коэффициенты корреляции являются значимыми с надежностью вывода не менее 0,94.

Проведенные комплексные исследования оценки качества структуры и механического поведения цементного камня с водоцементным отношением от нормальной густоты до максимальной водоудерживающей способности цементного камня в возрастном диапазоне от 3 до 90 суток позволили получить регрессионные зависимости основных свойств цементного камня, функции которых могут быть использованы, с одной стороны, как прогностические, а с другой стороны, как расчетные параметры цементного камня (клея) в достаточно широком диапазоне его плотности и возраста.

По экспериментальной акустической ветви энерговыделения представляется возможным прогнозировать предразрушающее состояние, судить о степени хрупкости и осуществлять рецептурно-технологическую оптимизацию структуры цементного камня. Использованный в исследовании подход к оценке трещиностойкости цементного камня с помощью методов внутреннего трения и акустической эмиссии открывает новые экспериментальные возможности совершенствования структуры цементного камня (клея).

Список литературы

1. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 103–106.  
2. Максимова, И.Н. Методологические аспекты комплексной оценки механического поведения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1 (22). – С. 28–33.  
3. Макридин, Н.И. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 26–29.

References

1. Kalashnikov, V.I. Terminology of science on the concrete of new generation / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2011. – № 3. – P. 103–106.  
2. Maksimova, I.N. Methodological aspects of the integrated assessment modelling the mechanical behavior of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Ju.V. Polubarova // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 1 (22). – P. 28–33.  
3. Makridin, N. I. Acoustic emission method in construction materials / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova // Building materials. – 2007. – № 3. – P. 26–29.



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

**Ерошкина Надежда Александровна**,  
кандидат технических наук, инженер-исследо-  
ватель научно-исследовательского сектора  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

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

**Полубаров Евгений Николаевич**,  
магистрант кафедры «Технологии  
строительных материалов и  
деревообработки»  
E-mail: en\_polubarov@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

**Eroshkina Nadezda Alexandrovna**,  
Candidate of Sciences, engineer-researcher  
of scientific and research sector  
E-mail: n\_eroshkina@mail.ru

**Korovkin Mark Olimpiyevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Technology of building  
materials and wood processing»  
E-mail: m\_korovkin@mail.ru

**Polubarov Evgeny Nikolaevich**,  
Undergraduate student of the department  
«Technology of building materials and wood  
processing»  
E-mail: en\_polubarov@mail.ru

## ОЦЕНКА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД\*

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, Е.Н. Полубаров

Приведены результаты исследования зависимости прочности геополимерного вяжущего от количества несвязанной щелочи. Показано, что для прогнозирования прочности вяжущего может быть использовано содержание свободной щелочи в вяжущем в начальные сроки твердения.

*Ключевые слова: геополимерное вяжущее, структурообразование, щелочной активатор, магматические горные породы, несвязанная щелочь, прогнозирование прочности, методика*

## ESTIMATING STRUCTURE OF FORMATION AND FORECASTING OF STRENGTH OF GEOPOLYMER BINDER BASED ON MAGMATIC ROCKS

N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, E. N. Polubarov

Results of the study of strength of geopolymer binder dependence on the content of unbound alkali are given. It is shown that alkali content in the binder in the initial period of hardening can be used to forecast the strength of the binder.

*Keywords: geopolymer binder, alkaline activator, magmatic rocks, unbound (free) alkali, hardening, forecasting strength, method*

Вяжущие на основе активированных щелочами измельченных горных пород и модифицирующих добавок являются одной из разновидностей геополимеров – неорганических материалов с полимерной структурой [1, 2]. Широкое внедрение в строительную практику геополимерных материалов сдерживается отсутствием ясных представлений о процессах, протекающих в этих материалах при их твердении и эксплуатации, что не позволяет сегодня создать промышленную технологию

\* Выполнено в рамках государственной работы «Обеспечение проведения научных исследований».

геополимерных строительных материалов, а также достоверно прогнозировать их эксплуатационное поведение.

К числу главных характеристик структуры этих материалов на микроуровне можно отнести степень полимеризации и размерность полимерных цепей, а на макроуровне – структуру пор [2]. Эти параметры определяют технико-строительные свойства геополимерных материалов – прочность при сжатии и растяжении, деформативность, водопоглощение, водо- и газопроницаемость и др.

Одной из важнейших проблем, затрудняющих исследования микроструктуры геополимерного вяжущего является отсутствие достаточно информативных методов исследования процессов геополимеризации материалов на основе различных видов сырья. Для идентификации этих процессов и продуктов реакций в геополимерах наиболее достоверными считаются результаты, полученные методом ядерного магнитного резонанса [1, 3]. Однако и этот метод дает ответы далеко не на все вопросы, связанные со структурообразованием на микроуровне. Необходима разработка новых методик исследования процессов геополимеризации.

При оптимизации состава вяжущего и режима его твердения целесообразно использовать упрощенные показатели степени геополимеризации материала. В качестве такого показателя может быть использовано содержание в материале несвязанной щелочи, так как оно характеризует количество вступившего в реакцию геополимеризации активатора твердения.

Роль щелочи в структурообразовании геополимерного вяжущего неоднозначно оценивается различными исследователями этого материала. Многие авторы сходятся во мнении о том, что на первом этапе происходит растворение алюмосиликатных минералов в сильнощелочном растворе [1, 3]. При этом каркасные и ленточные и другие структуры минералов расщепляются на мономеры, из которых затем в процессе уплотнения образуются полимерные структуры.

Исследования геополимеров методами термического анализа, ядерного магнитного резонанса, ртутной порометрии и ВЕТ позволили V.F. Barbosa и др. [3] уточнить их структуру. Эти авторы считают, что в порах геополимера содержатся вода и катионы натрия или калия, химически с ним не связанные (рис. 1). При высушивании они мигрируют на поверхность материала и подвергаются атмосферной карбонизации.

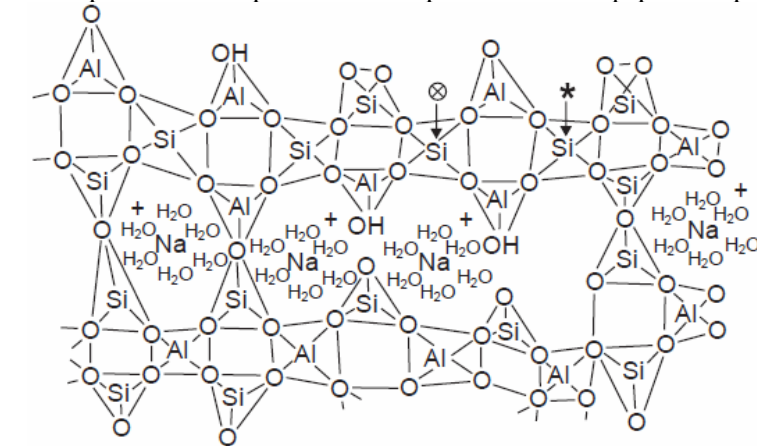


Рис.1. Модель микроструктуры геополимеров [1]

Davidovits считает, что структуру материала образуют тетраэдры  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  и  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ , связанные между собой кислородными мостиками. Соединения  $\text{Si-O-Al}$  замыкаются в цепи и кольца (рис. 2). Положительные ионы ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) компенсируются отрицательно заряженным четырехкоординатным Al. В работе [4] также высказывается мнение о том, что щелочные катионы компенсируют отрицательный заряд, возникающий при замещении кремнекислородного тетраэдра на  $\text{AlO}_4$ , благодаря чему геополимеры обладают высокой водостойкостью и устойчивостью к выщелачиванию.

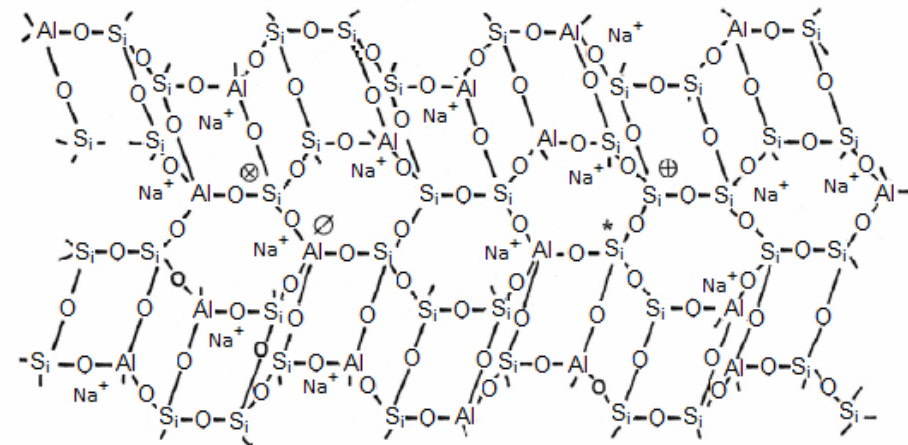


Рис. 2. Структура геополимеров, по J. Davidovits [1]

Анализ сведений о роли щелочи в структурообразовании геополимерных вяжущих [1, 3] показывает, что этот компонент является важной составной частью химической структуры геополимера. Это позволяет использовать в качестве показателя структурообразования количество химически не связанной, растворимой щелочи. Применение этого показателя структурообразования возможно только с учетом практических особенностей получения геополимерного вяжущего, которые заключаются в том, что для повышения скорости твердения и снижения усадочных деформаций [1, 5] в активатор твердения вводится больше щелочи, чем необходимо для синтеза химической структуры геополимера. В связи с этим необходимо экспериментальное выявление зависимостей между прочностью геополимерного вяжущего и количеством химически не связанной щелочи.

Методы и материалы исследования

Исследования зависимости между прочностью минерально-щелочного вяжущего и количеством несвязанной щелочи проводились на геополимерном вяжущем на основе магматической горной породы с добавкой гранулированного шлака при соотношении этих компонентов 3:1. Для приготовления вяжущих было взято 6 образцов горных пород: базальт, перидотит, габбро-диабаз и граниты трех месторождений. Для приготовления активатора твердения вяжущего использовался раствор силиката натрия с силикатным модулем 2,4. В этот раствор дополнительно вводилась щелочь для снижения модуля до 1,4. Снижение силикатного модуля производилось с целью минимизации усадочных деформаций вяжущего [5]. Из полученного вяжущего формовались образцы размером 20×20×20 мм.

Для оценки содержания в вяжущем свободной щелочи образцы после различных сроков твердения погружались в дистиллированную воду в изолированных от атмосферного воздуха емкостях. После выдержки образцов в воде в течение различных сроков определялось содержание щелочи в водной вытяжке с помощью титрования 0,1 н раствором соляной кислоты. Затем рассчитывалось, какая часть щелочи, содержащейся в активаторе твердения, растворилась в воде. Эта величина использовалась в качестве показателя свободной, несвязанной щелочи (Щс).

Для более точной оценки содержания несвязанной щелочи в геополимерном камне образцы после 3 и 7 суток твердения в нормальных условиях измельчались до прохода через сито № 008. После этого 20 г измельченной пробы помещалось в емкость со 100 мл дистиллированной воды, которая закрывалась герметичной крышкой, затем полученная суспензия взбалтывалась и выдерживалась в течение 3 или 24 часов. Исследуемые пробы за полчаса до испытания снова взбалтывались, и после отстаивания отбиралось по 50 мл отфильтрованной жидкости для определения концентрации путем титрования 0,01-нормальным раствором соляной кислоты.

Для образцов, твердевших в нормальных условиях в течение 28 суток, определялась прочность при сжатии  $R_{сж}$ . Затем методом корреляционного анализа находились зависимости между прочностными характеристиками вяжущих и содержанием щелочи в водной вытяжке.

Результаты и их обсуждение

Определение доли растворенной щелочи в зависимости от продолжительности экспонирования в воде образцов, которые твердели в течение различных сроков в воздушно-влажностных условиях, позволили установить, что значительная часть щелочи из геополимерного камня переходит в раствор (рис. 3). Увеличение продолжительности твердения снижает количество свободной щелочи, но даже после твердения в течение 56 сут из вяжущего экстрагируется около 25 % щелочи активатора.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, позволяет сделать вывод о том, что образование химической структуры вяжущего продолжается даже после выбывания щелочи из геополимерного камня, так как содержание щелочи в растворе, окружающем образцы, через 10...20 сут постепенно снижается. Это свидетельствует о потреблении NaOH в синтезе химической структуры геополимера.

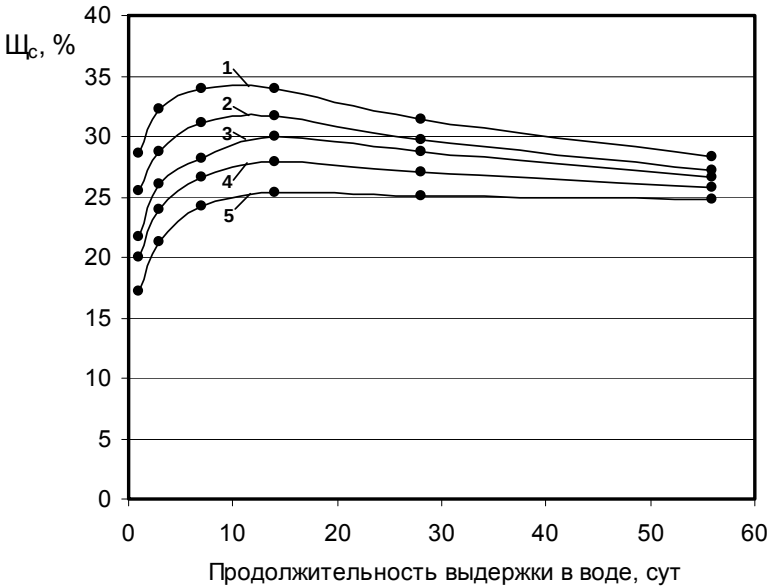


Рис. 3. Зависимость доли щелочи активатора твердения геополимерного камня в зависимости от времени экспозиции в воде для образцов, которые твердели в течение 3 (1), 7 (2), 14 (3), 28 (4), 28 суток (5) в воздушно-влажностных условиях

Определялись концентрации щелочи в водной вытяжке из вяжущих, твердевших после экстракции в течение 3 и 24 ч, –  $C_3^3$  и  $C_{24}^3$  соответственно, а также после твердения в течение 7 сут – соответственно  $C_3^7$  и  $C_{24}^7$  (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Концентрация щелочи в водной вытяжке и прочность вяжущих, приготовленных с применением различных горных пород

| № п/п | Горная порода (основной компонент вяжущего) | Концентрация щелочи в водной вытяжке, мг/100 мл |            |         |            | $R_{сж}$ , МПа |
|-------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|---------|------------|----------------|
|       |                                             | $C_3^3$                                         | $C_{24}^3$ | $C_3^7$ | $C_{24}^7$ |                |
| 1     | Базальт                                     | 45,1                                            | 50,9       | 16,9    | 25,4       | 70,3           |
| 2     | Габбро-диабаз                               | 51,5                                            | 58,8       | 23,7    | 29,7       | 58,8           |
| 3     | Перидотит                                   | 39,4                                            | 54,3       | 17,2    | 27,6       | 66,6           |
| 4     | Гранит 1                                    | 53,3                                            | 61,5       | 24,4    | 31,1       | 52,4           |
| 5     | Гранит 2                                    | 44,9                                            | 54,9       | 19,3    | 28,0       | 58,2           |

Между прочностью  $R_{сж}$  и значениями концентрации щелочи в водной вытяжке из вяжущих при различных условиях эксперимента прослеживаются обратно пропорциональные зависимости (рис. 4). В связи с этим концентрация в водной вытяжке может быть использована в качестве косвенной характеристики структурообразования и для прогнозирования прочности. Результаты статистического анализа этих зависимостей (корреляционные уравнения и коэффициент корреляции) приведены в табл. 2.

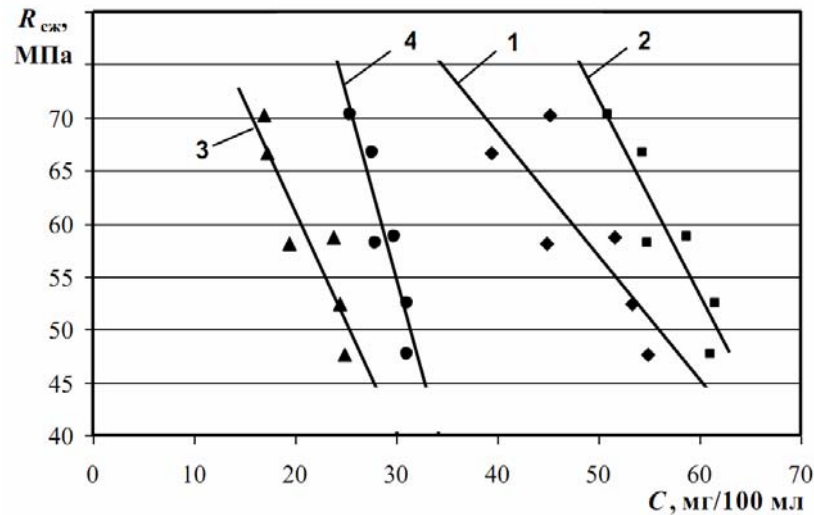


Рис. 4. Зависимость прочности от ее косвенных характеристик

Т а б л и ц а 2  
Результаты корреляционного анализа зависимостей прочности и концентрации щелочи

| № п/п | Продолжительность |               | Уравнение регрессии                    | Коэффициент корреляции |
|-------|-------------------|---------------|----------------------------------------|------------------------|
|       | твердения, сут    | экстракция, ч |                                        |                        |
| 1     | 3                 | 3             | $R_{сж} = 115,4 - 1,17 \cdot C_3^3$    | 0,82                   |
| 2     |                   | 24            | $R_{сж} = 164,0 - 1,85 \cdot C_{24}^3$ | 0,89                   |
| 3     | 7                 | 3             | $R_{сж} = 102,7 - 2,08 \cdot C_3^7$    | 0,89                   |
| 4     |                   | 24            | $R_{сж} = 160,2 - 3,51 \cdot C_{24}^7$ | 0,90                   |

Коэффициенты корреляции для исследованных величин достаточно высоки, что позволяет считать, что по количеству экстрагированной из вяжущих щелочи можно достоверно прогнозировать прочность.

Концентрация щелочи в водной вытяжке повышается при увеличении продолжительности экстракции с 3 до 24 ч. Это связано с тем, что на начальных этапах выдерживания в воде в раствор переходит в основном химически не связанная щелочь. При увеличении продолжительности экстракции щелочные фазы, образовавшиеся в условиях сильнощелочной среды, постепенно разлагаются, выделяя в раствор дополнительное количество щелочи.

Имеются данные [2], указывающие на то, что щелочные металлы находятся в структуре геополимера, но химически с ним не связаны. В этом случае увеличение концентрации щелочи в водной вытяжке можно объяснить диффузией атомов и переходом их в раствор. И в первом, и во втором случае повышение концентрации щелочи в растворе при увеличении продолжительности экстракции является косвенной характеристикой степени геополимеризации.

Выводы

Проведенные исследования показали, что концентрация щелочи в водной вытяжке из вяжущего, твердевшего в течение 3 и 7 суток, имеет высокую степень корреляции с его прочностью в возрасте 28 суток. При увеличении продолжительности твердения и экстракции коэффициент корреляции между концентрацией и прочностью возрастает.

Предлагаемая методика является косвенной характеристикой структурообразования геополимерного вяжущего и может быть использована для прогнозирования его прочности.

Список литературы

1. Davidovits, J. Geopolymer chemistry and applications. 3<sup>rd</sup> edition. – France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2011. – 614 p.  
2. Ерошкина, Н.А. Минерально-щелочные вяжущие: моногр./ Н.А. Ерошкина, В.И.Калашников, М.О. Коровкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. -152 с.  
3. Barbosa, V. F. F. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers / V.F.F.Barbosa, K.J.D. MacKenzie, C. Thaumaturgo // Int. J. Inorg. Mater. – 2000. – Vol. 2, Issue 4, 2. – P. 309–317.  
4. Корнеев, В.И. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности / В. И.Корнеев, А. С. Брыков // Цемент и его применение. – 2010. – № 2. – С. 51–55.  
5. Ерошкина, Н.А. Влияние параметров состава минерально-щелочного вяжущего на прочность и усадку бетона / Н. А.Ерошкина, М.О. Коровкин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2012. – № 27. – С. 78–83.

References

1. Davidovits, J. Geopolymer chemistry and applications. 3<sup>rd</sup> edition. – France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2011. – 614 p.  
2. Eroshkina, N.A. Mineral-alkali binders: monogr. / N.A. Eroshkina, V.I. Kalashnikov, M.O. Korovkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 152 p.  
3. Barbosa, V. F. F. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers / V.F.F.Barbosa, K.J.D. MacKenzie, C. Thaumaturgo // Int. J. Inorg. Mater. – 2000. – Vol. 2, Issue 4, 2. – P. 309–317.  
4. Korneyev, V.I. Development prospects for general construction binders. Geopolymers and their distinctive features / V.I. Korneyev, A.S. Brykov // Cement and its Applications. – 2010. – N.2. – P. 51–55.  
5. Eroshkina, N.A. The influence of parameters of mineral alkaline binder composition on the strength and shrinkage of concrete / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2012. – N. 27. – P. 78–83.



УДК 666.9:661.185.7

Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева  
Россия, 430005, г. Саранск,  
ул. Большевикская, д. 68  
тел.: (8342) 48-25-64

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

**Ушкина Виктория Валентиновна**  
аспирант кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: ntaevv@mail.ru

Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.,  
tel.: (8342) 48-25-64

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

**Ushkina Victoria Valentinovna**  
Postgraduate of the department «Applied  
mechanics»  
E-mail: ntaevv@mail.ru

# БЕЛКОВЫЙ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ МИКРОБНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕСТЫХ БЕТОНОВ

В.Д. Черкасов, В.В. Ушкина

Представлены результаты исследования пенообразующих добавок, полученных гидролизом биомассы гриба рода *Geothrichum*. Показана высокая кратность и стойкость полученных пен. Подобраны концентрация стабилизатора и оптимальное время выдержки перед вспениванием.

*Ключевые слова: пенообразователь, пенобетон, ячеистый бетон, кратность, стойкость, испытания*

## PROTEIN FOAM GENERATOR ON THE BASIS OF MICROBE SYNTHESIS PRODUCTS FOR CELLULAR CONCRETE PRODUCTIONS

V.D. Cherkasov, V.V. Ushkina

The results of study of the foaming additives obtained by hydrolysis of biomass fungus of *Geotrichum* are presented. The high multiplicity and stability of the obtained foams are shown. Stabilizer concentration and optimal exposure time before foaming are chosen.

*Keywords: foaming agent, foam concrete, cellular concrete, multiplicity, stability, testing*

### Введение

Белковые пенообразователи являются перспективным порообразующим веществом. Преимущества модификаторов белковой природы перед синтетическими заключаются в том, что они не снижают прочности готового пенобетона и практически не влияют на сроки схватывания и твердения. Однако их массовому распространению продолжает мешать высокая стоимость. Снижение себестоимости добавки, сопряженной с сохранением свойств, является одной из задач современного строительного материаловедения. Существует несколько вариантов решения проблемы. Первый подход состоит в том, что в качестве источника белка используют промышленные отходы (барда, мицеллиальные отходы производства антибиотиков). Второй заключается в том, что ведут направленное культивирование микроорганизмов, вырабатывающих поверхностно-активные вещества или их предшественников [1]. Существует достаточное разнообразие культур, содержащих значительные количества белка (*Saccharomyces cerevisiae*, грибы рода *Candida* и т.д.). В работе [2] использовали в качестве сырья мицелий *P. chrisogenum*.

Полученный белковый продукт необходимо подвергнуть гидролизу. В качестве катализатора можно использовать кислоту, щелочь или же фермент биологического происхождения. В связи с высокой стоимостью ферментных препаратов оптимальным можно считать химический гидролиз. Частичный гидролиз белка приводит к образованию пептидных молекул различной длины, а более глубокий – свободных аминокислот. Продукты протеолиза обладают поверхностно-активными свойствами и снижают натяжение на границе вода/воздух на 10-15 %. Свойства гидролизата определяются соотношением высоко- и низкомолекулярных компонентов в смеси. Пенообразование здесь требует больших затрат энергии на перемешивание, чем при использовании синтетических добавок, однако стойкость образующейся пены выше за счет большего давления газа в пузырьках [3, 4].

### Материалы и методы

В работе в качестве источника белка была использована пятисуточная культура гриба рода *Geothrichum*, выращенная на полусинтетической среде. Гидролиз вели, основываясь на методе, приведенном в [5], причем гидролизующий агент поменяли на NaOH. Щелочь вносили в концентрациях 0,6-1 Моль/л. Гидролиз вели при температуре 92-93 °С в течение 1-5 часов. В растворах определяли концентрацию сухих веществ, плотность, кратность и стойкость пены как процент жидкости от общего объема, выделившейся за 1 час. Оптимальной считали кратность пены не ниже 10, стойкость, равную 0. Поверхностное натяжение растворов ПАВ измеряли при температуре 20 °С, предварительно выдерживая пробы в термостате в течение 30 минут. Математический план эксперимента представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования эксперимента и свойства гидролизатов

| №<br>п/п | Матрица<br>планирования |    | Рабочая матрица               |      | Свойства гидролизатов |                            |                |                          |
|----------|-------------------------|----|-------------------------------|------|-----------------------|----------------------------|----------------|--------------------------|
|          | X1                      | X2 | C <sub>NaOH</sub> ,<br>Моль/л | t, ч | σ,<br>мН/м            | W <sub>св</sub> , %<br>мас | Крат-<br>ность | Водоот-<br>деление,<br>% |
| 1        | -1                      | -2 | 0,6                           | 1    | 35,2                  | 6,780                      | 5              | 0                        |
| 2        | -1                      | -1 | 0,6                           | 2    | 38,1                  | 7,140                      | 6,25           | 0                        |
| 3        | -1                      | 0  | 0,6                           | 3    | 35,2                  | 7,350                      | 5,85           | 0                        |
| 4        | -1                      | 1  | 0,6                           | 4    | 33,3                  | 7,280                      | 9,3            | 0                        |
| 5        | -1                      | 2  | 0,6                           | 5    | 33,3                  | 7,030                      | 10,8           | 0                        |
| 6        | 0                       | -2 | 0,8                           | 1    | 35,2                  | 7,950                      | 4,6            | 0                        |
| 7        | 0                       | -1 | 0,8                           | 2    | 33,2                  | 7,250                      | 7,15           | 0                        |
| 8        | 0                       | 0  | 0,8                           | 3    | 33,2                  | 8,130                      | 10,15          | 0                        |
| 9        | 0                       | 1  | 0,8                           | 4    | 30,3                  | 9,880                      | 13,4           | 0                        |
| 10       | 0                       | 2  | 0,8                           | 5    | 35,2                  | 8,090                      | 12,85          | 18,5                     |
| 11       | 1                       | -2 | 1,0                           | 1    | 37,2                  | 9,150                      | 6              | 0                        |
| 12       | 1                       | -1 | 1,0                           | 2    | 30,3                  | 9,350                      | 13,15          | 0                        |
| 13       | 1                       | 0  | 1,0                           | 3    | 32,3                  | 10,770                     | 11,9           | 16,5                     |
| 14       | 1                       | 1  | 1,0                           | 4    | 34,2                  | 12,650                     | 9,65           | 12,5                     |
| 15       | 1                       | 2  | 1,0                           | 5    | 34,2                  | 9,090                      | 10,7           | 2,5                      |

### Результаты и обсуждение

Анализ проведенного ПФЭ позволил получить следующие математические модели изменения свойств пенообразователя. Проверка адекватности моделей по критерию Фишера (α=0,95) показала соответствие расчетных и опытных данных.

Процентное содержание сухих веществ в гидролизате

$$W_{св} = 8,13 + 1,71x_1 + 1,74x_2 + 1,07x_1x_2 + 0,93x_1^2 + 0,59x_2^2 - 0,60x_1^2x_2 + 0,30x_1x_2^2 - 0,44x_1^2x_2^2 - 0,43x_2^3 - 0,28x_1x_2^3 + 0,15x_1^2x_2^3 - 0,15x_2^4 - 0,11x_1x_2^4 + 0,05x_1^2x_2^4.$$

Поверхностное натяжение

$$\sigma = 33,25 - 1,47x_1 - 1,95x_2 + 2,81x_1x_2 + 0,49x_1^2 - 2,12x_2^2 + 1,99x_1^2x_2 - 0,42x_1x_2^2 + 2,26x_1^2x_2^2 + 0,49x_1^3 - 0,61x_1x_2^3 - 0,77x_1^2x_2^3 + 0,65x_2^4 + 0,18x_1x_2^4 - 0,55x_1^2x_2^4.$$

Кратность

$$n = 10,15 + 3,03x_1 + 3,48x_2 - 2,14x_1x_2 - 1,27x_1^2 + 0,29x_2^2 - 4,07x_1^2x_2 - 1,38x_1x_2^2 + 0,73x_1^2x_2^2 - 0,35x_2^3 + 0,50x_1x_2^3 + 0,83x_1^2x_2^3 - 0,16x_2^4 + 0,17x_1x_2^4 - 0,14x_1^2x_2^4.$$

Водоотделение из пены за 1 ч

$$c = -8,25x_1 + 1,54x_2 + 4,06x_1x_2 + 8,25x_1^2 - 0,77x_2^2 - 5,60x_1^2x_2 + 6,20x_1x_2^2 - 5,43x_1^2x_2^2 - 1,54x_2^3 - 0,94x_1x_2^3 + 2,48x_1^2x_2^3 + 0,77x_2^4 - 1,07x_1x_2^4 + 0,30x_1^2x_2^4.$$

Поверхность отклика изображена на рис. 1-4. Увеличение времени гидролиза и концентрации NaOH приводит к увеличению содержания сухих веществ. Максимальная кратность, полученная экспериментально, составила 14 и была зафиксирована для растворов ПАВ, полученных гидролизом при концентрации щелочи 1 Моль/л в течение 2 часов и 0,8 Моль/л в течение 4 часов. Максимумы кратности полностью соответствуют точкам факторного пространства, для которых характерно минимальное значение поверхностного натяжения.

Для удобства стабильность, определяемую как количество времени, необходимое для выделения 50 % жидкости из пены, была заменена стойкостью. Выделение жидкой фазы для большей части проб зафиксировано не было.

Для дальнейших исследований использовали 2 раствора ПАВ. Условия, в которых они были получены, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Условия получения пенообразующих добавок I и II

| Добавка | t, ч | C <sub>NaOH</sub> , Моль/л |
|---------|------|----------------------------|
| I       | 2    | 1,0                        |
| II      | 4    | 0,8                        |

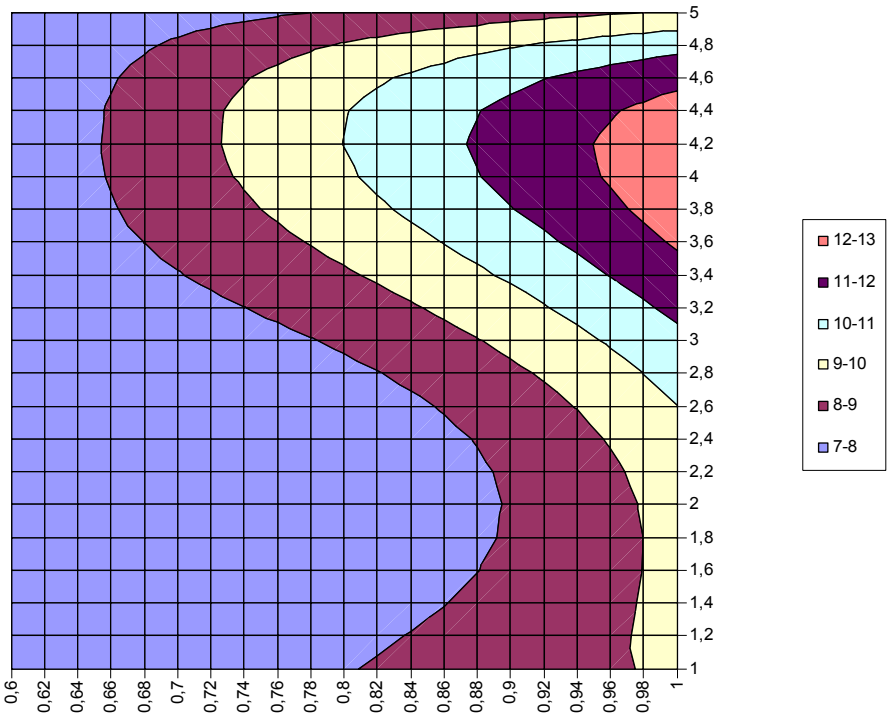


Рис. 1. Зависимость содержания сухих веществ пенообразователя от концентрации гидролизующего агента и продолжительности процесса

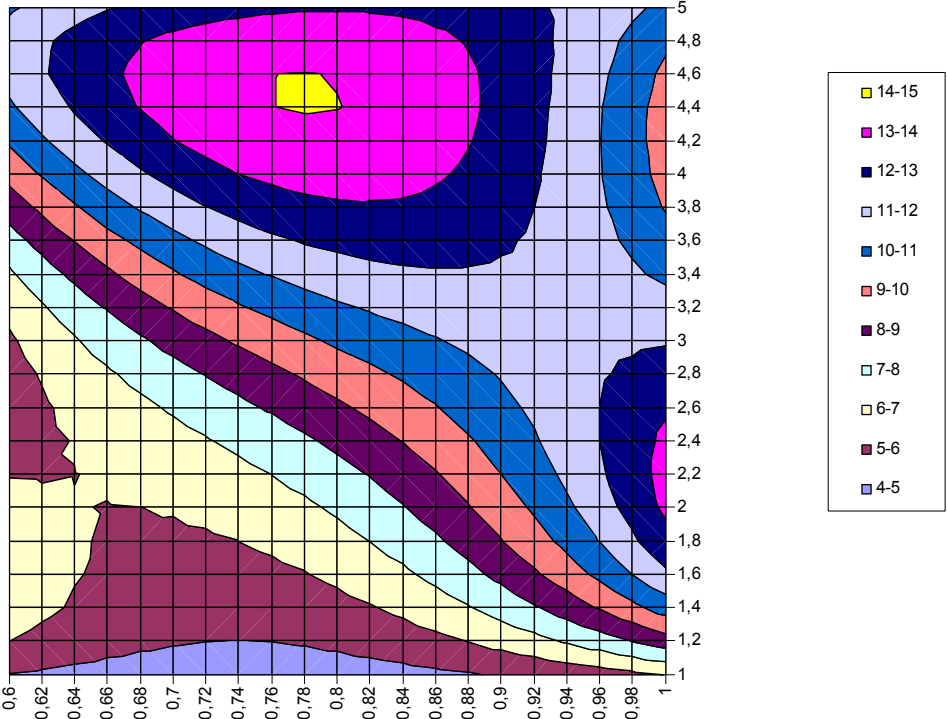


Рис. 2. Зависимость кратности пены от концентрации гидролизующего агента и продолжительности процесса

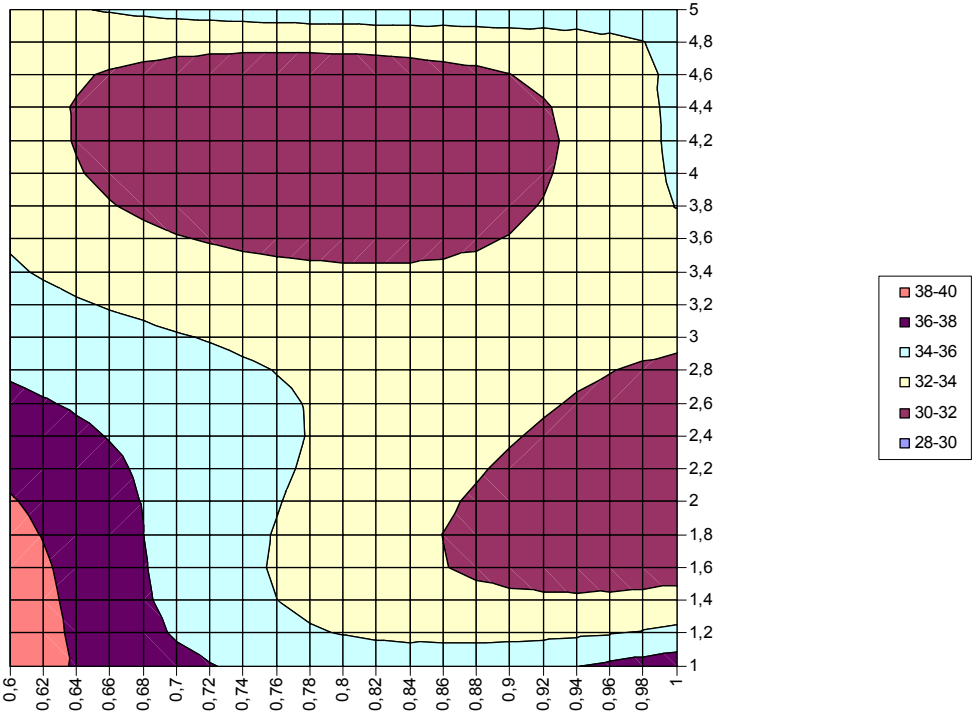


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения раствора ПАВ на границе вода/воздух от условий гидролиза



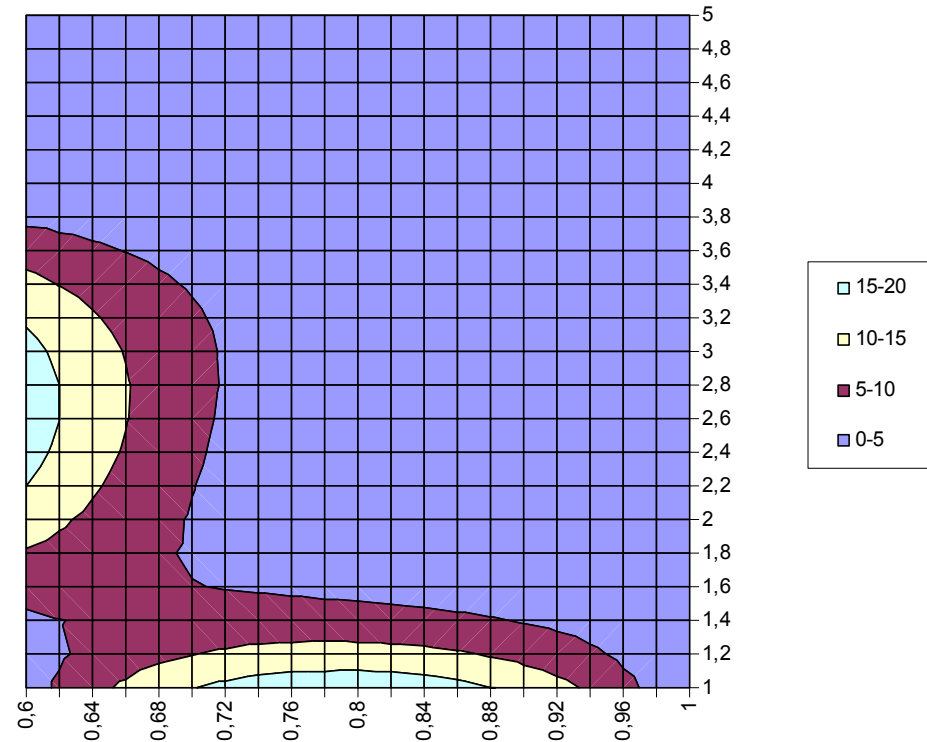


Рис. 4. Зависимость стойкости пены от условий гидролиза

Исследование свойств добавок включало определение критической концентрации мицеллообразования, оптимального процента внесения стабилизатора пены, характера поведения пены при её хранении в течение 1 месяца, а также влияние замораживания на стойкость и кратность пены.

Для определения критической концентрации мицеллообразования было измерено поверхностное натяжение растворов ПАВ. Определение оптимального времени выдержки перед вспениванием проводилось для растворов ПАВ с концентрацией, соответствующей ККМ. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Свойства добавок

| Параметр                                         | Добавка I    | Добавка II                      |
|--------------------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Концентрация СВ, %                               | 9,35         | 9,88                            |
| Концентрация органического компонента, % от СВ   | 24,1         | 28,1                            |
| Плотность раствора ПАВ, г/см <sup>3</sup>        | 1,061        | 1,063                           |
| Кратность                                        | 13,2         | 13,4                            |
| Водоотделение за 1 час, %                        | 0            | 0                               |
| ККМ, %                                           | 2,5          | 2,5                             |
| Время выдержки перед вспениванием, мин           | 15           | 30                              |
| Концентрация стабилизатора, % масс.              | 0,31         | 0,31                            |
| Снижение кратности при замораживании             | на 10,6 %    | на 21,0 %                       |
| Снижение стойкости при замораживании             | не снижается | до 7,3 % водоотделения за 1 час |
| Снижение кратности при хранении в течение 30 сут | на 2,4 %     | на 4,0 %                        |
| Снижение стойкости при хранении в течение 30 сут | не снижается | не снижается                    |

Сравнение характеристик добавок показало, что несмотря на небольшое различие в кратности получаемой пены, наиболее перспективной для дальнейшего использования является добавка I.

Выводы

1. Оптимальными условиями для получения пенообразователя гидролизом мицеллиальной биомассы гриба рода *Geothrichum* является продолжительность, равная 2 часам при концентрации щелочи, равной 1 Моль/л;
2. Полученный пенообразователь обладает следующими характеристиками: кратность 13, водоотделение 0 %.

Список литературы

1. Al-Araji L. Minireview Microbial surfactant / L. Al-Araji, R.N.Z.R.A. Rahman, M. Basri, A. B. Sallen // Asia Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology. – 2007. – №15. – P. 99–105.

2. Киселев, Е.В. Разработка пенобетонов низкой плотности на белковом пенообразователе: дис. ... канд. тех. наук / Е.В. Киселев. – Пенза, 2000. – 185 с.

3. Шахова, Л.Д. Модели образования пеноцементоминеральных систем / Л.Д. Шахова, В.С. Лесовик // Строительные материалы. – 2008. – №1. – С. 31–33.

4. Шахова, Л.Д. Роль пенообразователей в технологии пенобетонов / Л.Д. Шахова // Строительные материалы. – 2007. – №4. – С. 16–19.

5. Пат. 2141930 Российская Федерация, МПК C04B38/10, C04B24/14. Способ приготовления белкового пенообразователя / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, заявитель и патентообладатель «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» – №98107689/03; заявл. 21.04.1998; опубл. 27.11.1999. – 2 с.

References

1. Al-Araji L. Minireview Microbial surfactant / L. Al-Araji, R.N.Z.R.A. Rahman, M. Basri, A. B. Sallen // Asia Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology. – 2007. – №15. – P. 99–105.

2. Kiselev, E.V. The development of low-density foam concrete at the protein foaming agent: PhD dissertation (Construction materials and products) / E.V. Kiselev. – Penza, 2000. – 185 p.

3. Shahova, L. D. Penotsementomineralnyh systems education models / L.D. Shahova, V.S. Lesovik // Construction Materials. – 2008. – №1. – P. 31–33.

4. Shakhova, L.D. The role of the blowing agent in the foam concrete technology / L.D. Shakhova // Construction Materials. – 2007. – №4. – P. 16–19.

5. Pat. 2141930 Russian Federation S04V38 IPC / 10 S04V24 / 14. A method for protein foaming agent preparing / V.I. Solomатов, V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, applicant and patentee “Ogarev Mordovia State University” – №98107689 / 03; appl. 21.04.1998; publ. 27.11.1999. – 2 p.

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

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

**Жуков Александр Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством и  
технология строительного производства»  
E-mail: zhukov.penza@yandex.ru

**Пышкина Ирина Сергеевна**,  
аспирант  
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

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

**Zhukov Alexander Nikolaevich**,  
Candidate of technical sciences, associate  
professor the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: zhukov.penza@yandex.ru

**Pyshkina Irina Sergeevna**,  
Postgraduate  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СУХОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГИДРОСИЛИКАТОВ\*

В.И. Логанина, А.Н. Жуков, И.С. Пышкина

Приведены сведения по оценке трещиностойкости покрытий на основе известковой сухой строительной смеси с применением добавок, включающих гидросиликаты, синтезированные в присутствии диатомита. Показано, что значения растягивающих напряжений не превышают когезионную прочность отделочного слоя.

*Ключевые слова: добавка, гидросиликаты кальция, сухие строительные смеси, диатомит*

## EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF COATINGS ON BUILDING MIXES WITH APPLICATION OF SYNTHETIC HYDROUS SILICATE

V.I. Loganina, A.N. Zhukov, I.S. Pyshkina

The article presents information on crack resistance assessment of coatings on the basis of dry lime mortar using additives based on hydrosilicates synthesized with diatomite. It is shown that the values of tensile stresses do not exceed the cohesive strength of the finishing layer.

*Keywords: additive, hydrous calcium, dry mixes, diatomite*

В проведенных ранее исследованиях была подтверждена эффективность введения в рецептуру отделочных известковых сухих строительных смесей (ССС) минеральных добавок на основе синтезированных гидросиликатов кальция ГСК, способствующих повышению стойкости известковых покрытий [1,2].

Методом рентгенофазового анализа установлено, что степень закристаллизованности синтезированных гидросиликатов невысокая, образуются гидросиликаты кальция различной основности [3]. Учитывая, что низкоосновные гидросиликаты кальция обладают более высокой прочностью, в продолжение дальнейших исследований при синтезе добавки использовали дополнительно материалы, содержащие аморфный кремнезем,

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части.

в частности, Инзенский диатомит с удельной поверхностью  $S_{уд} = 19000 \text{ см}^2/\text{г}$  и средним размером частиц, равным 1,3 мкм.

Синтез добавки заключался в осаждении жидкого стекла в присутствии раствора хлорида кальция. В работе использовались два режима синтеза ГСК: 1 режим – осаждение в присутствии 15 %-го раствора  $\text{CaCl}_2$  в количестве 50 % от массы жидкого стекла; 2 режим – осаждение в присутствии 10 %-го раствора  $\text{CaCl}_2$  в количестве 50 % от массы жидкого стекла с добавлением диатомита, при этом соотношение жидкость:твердая фаза (Ж:Т) составляло (Ж:Т)=1:2. Полученный осадок высушивался при температуре 100°C.

Синтезированные добавки применялись для разработки рецептуры известковой ССС.

Разработанная рецептура включает в себя известь–пушонку 2 сорта, кварцевый песок 80 % фракции 0,63–0,315, 20 % фракции 0,315–0,14. Для регулирования структурно-механических характеристик известкового композита в рецептуру были введены пластифицирующая добавка Кратасол-ПФМ в количестве 1 % от массы извести, редиспергируемый порошок Neolith P-4400 в количестве 0,3 % от массы извести, гидрофобизатор Zincum-5 в количестве 0,5 % от массы извести. При этом содержание добавки ГСК составляло 30 % от массы извести. Готовились смеси с водоизвестковым отношением В/И=1,2.

Трещиностойкость покрытий оценивалась, исходя из условия:

$$\sigma < R_{kog}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – внутренние напряжения, МПа;  $R_{kog}$  – предел прочности при растяжении, МПа.

Оценка напряженного состояния отделочного покрытия проводилась по следующей методике. На диск из алюминиевой фольги диаметром 120 мм и толщиной 0,01 мм наносили отделочные составы толщиной 8 мм. На свободной стороне диска наклеивался тензодатчик с базой 10 мм, показания которого фиксировались микропроцессорной многоканальной тензометрической системой ММТС-64.01. Величина напряжений определялась по формуле

$$\sigma_0 = 2 \cdot \frac{(1 - \mu_1) \cdot h_2}{h_1} \cdot E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона;  $h_1$  – толщина отделочного слоя, м;  $h_2$  – толщина подложки, м;  $E$  – модуль упругости подложки, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация подложки.

На рис. 1 приведены кривые изменения внутренних напряжений в процессе отверждения отделочного слоя.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что в покрытии с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, зафиксированы наибольшие значения внутренних напряжений, максимальная величина которых составила  $\sigma=0,021$  МПа (см. рис. 1), в то время как у покрытия с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму – 0,018 МПа (см. рис. 1). Это, очевидно, объясняется тем, что добавка на основе ГСК, синтезированных в присутствии диатомита, ускоряет процесс раннего структурообразования покрытия и способствует увеличению прочностных характеристик отделочного состава в начальный период твердения.

Установлено, что максимальные значения внутренних напряжений отмечались в промежутке времени 5-7 часов после нанесения составов на поверхность с последующей релаксацией внутренних напряжений, которые стабилизировались к 22-24 часам.

Когезионная прочность покрытий оценивалась по показателю прочности при растяжении  $R_{kog}$ . Испытания проводились на разрывной машине ИР 5057-50 на образцах после 28 суток воздушно-сухого твердения. Метод основан на растяжении испытуемого образца до разрыва при скорости деформирования 1 мм/мин. Предел прочности при растяжении  $R_{kog}$ , МПа (Н/мм<sup>2</sup>), для каждого образца вычислялся по формуле

$$R_{kog} = \frac{F_{pi}}{S_{0i}}, \quad (3)$$

где  $F_{pi}$  – растягивающая нагрузка в момент разрыва, Н;  $S_{0i}$  – начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Модуль упругости вычислялся по диаграмме «напряжение – деформация» по тангенсу угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной к начальному прямолинейному участку диаграммы.

Модуль упругости для каждого образца ( $E_{упр}$ ) в МПа вычислялся по формуле

$$E_{упр} = \frac{R_{kog}}{\varepsilon_i}, \quad (4)$$

где  $R_{kog}$  – предел прочности при растяжении, МПа;  $\varepsilon_i$  – относительное удлинение при разрыве, мм/мм.

Полученные результаты (рис.2) свидетельствуют о том, что когезионная прочность и модуль упругости у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, выше и составляют  $R_{kog} = 0,49$  МПа и  $E_{упр} = 50$  МПа (см. рис. 2), а у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму, –  $R_{kog} = 0,41$  МПа и  $E_{упр} = 42,5$  МПа (см. рис. 2).

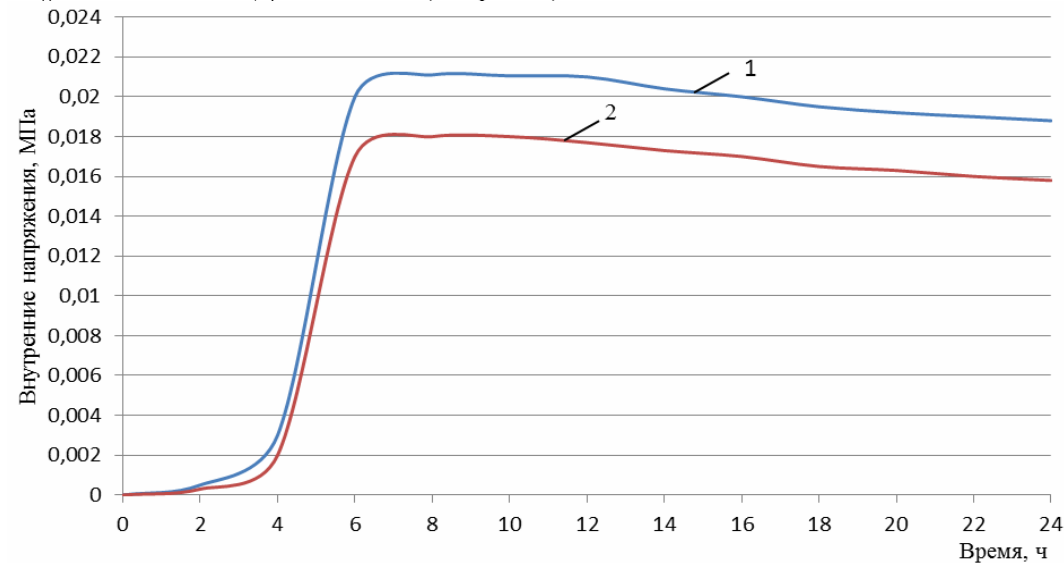


Рис. 1. Изменение внутренних напряжений в процессе твердения отделочного слоя:  
1 – известковый состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму;  
2 – известковый состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму

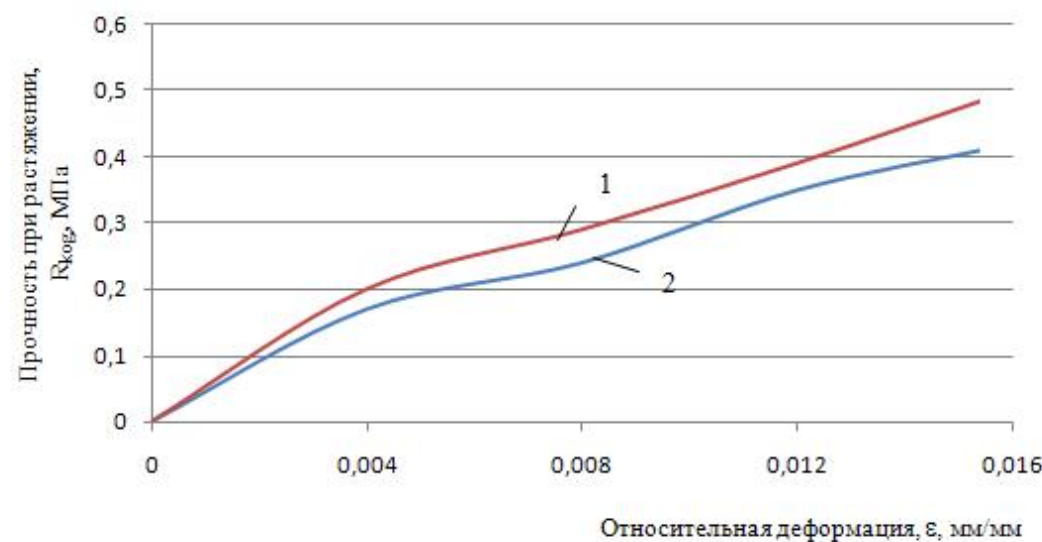


Рис.2. Изменение относительных деформаций при растяжении известковых покрытий:  
1 – известковый состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму;  
2 – известковый состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что покрытия на основе составов ССС с добавкой ГСК, синтезированных по 2-му режиму, удовлетворяют условиям (1) и обладают более высокой трещиностойкостью.

#### Список литературы

1. Логанина, В.И. Тонкодисперсные наполнители на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей / В. И. Логанина, Л.В. Макарова, Ю.А. Мокрушина // Строительные материалы. – 2010. – №2. – С. 36–39.
2. Логанина, В.И. Повышение водостойкости покрытий на основе известковых отделочных составов / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, С.Н. Кислицина, К.А. Сергеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – №1. – С. 41–46.
3. Логанина, В.И. Известковое композиционное вяжущее с применением синтезированных гидросиликатов кальция / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – №6. – С. 29–32.

#### References

1. Loganina, V.I. Fine fillers based on calcium silicate for dry construction mixtures / V.I. Loganina, L.V. Makarova, Yu.A. Mokrushina // Building materials. – 2010. – №2. – P. 36–39.
2. Loganina, V.I. increased water resistance of coatings based on lime finishing compositions / V.I. Loganina, L.V. Makarova, S.N. Kislitsina, K.A. Sergeeva // Proceedings of the higher educational institutions. Building. – 2012. – №1. – P. 41–46.
3. Loganina, V.I. Lime composite knitting using synthetic calcium Hydrosilicates / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // Bulletin of Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. – 2014. – №6. – P. 29–32.

УДК 691.175

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

**Гусев Николай Иванович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»

**Кочеткова Майя Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»  
E- mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

**Аленкина Елизавета Сергеевна**, студентка

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

**Gusev Nikolai Ivanovich**, Candidate of Sciences, Professor of the department «Quality management and Technology of construction production»

**Kochetkova Maya Vladimirovna**, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Quality management and technology of building production»  
E- mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

**Alenkina Elizaveta Sergeevna**, student

# АТМОСФЕРОСТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НАРУЖНЫХ СТЕН ИЗ ПЕНОБЕТОНА ПРИ ИХ ПЕРЕМЕННОМ УВЛАЖНЕНИИ, ВЫСУШИВАНИИ И ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, Е.С. Аленкина

Описано влияние переменного увлажнения и высушивания на атмосферостойкость двухслойных образцов из пенобетона с защитным покрытием из полимерцемента (в диапазоне до 50 циклов, с нагревом защитного покрытия до +110°С).

*Ключевые слова: состав одного цикла увлажнения и высушивания, ПВА-дисперсия, каучуковый латекс СКС-65ГП, прочность сцепления защитного покрытия с пенобетоном, нагрев фасада в эксплуатационный период*

## WEATHER PROOFFINISH COATING FOR EXTERNAL WALLS MADE OF FOAM CONCRETE UNDER VARIABLE HUMIDIFICATION, DRYING AND EXTREMELY HIGH TEMPERATURES

M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, E.S. Alenkina

The influence of variable wetting and drying of two-layer sample of foam concrete with protective coating of Polymer-cement (in the range of up to 50 cycles with heat protective coating to + 110 °C) on weather ability is studied.

*Keywords: part of one cycle of wetting and drying, PVA-dispersiya, latex SKS-65GP, the adhesive strength of the protective coating with foam concrete, heating facade in the operational period*

Переменное увлажнение и высушивание так же, как замораживание и оттаивание, вызывает в материале чередование деформаций, противоположных по знаку, и, как следствие, ведет к уменьшению прочности полимерцементных композитов. Эти деструктивные процессы особенно сильно проявляются на границе двух материалов – пенобетона и полимерцементного раствора – и тем интенсивнее, чем значительно отличаются их деформативные свойства.

Двухслойные образцы после водонасыщения в течение 16 часов при полном погружении в воду помещали в сушильный шкаф с температурой +110°С. Резкий перепад температур, а также парообразование в порах материала создавали жесткие

условия испытания. После 8-часовой сушки образцы погружали в воду с температурой +18°С на 16 часов. Визуальный осмотр и испытание на сцепление проводили через 15, 30 и 50 циклов испытаний. Таким образом, один цикл испытания включал в себя 16 часов водонасыщения при полном погружении в воду с температурой +18°С и высушивание при температуре +110°С в течение 8 часов. Следует отметить значительную разницу температурно-усадочных характеристик растворов с ПВАД и пенобетона. Уже на 3–4 цикле произошло отслоение фактурного слоя. Влияние количества полимера на прочность сцепления в этом случае не обнаружилось. Несколько большую долговечность показал контрольный состав без полимера. Отслоение фактурного слоя в этих образцах произошло после 6 циклов. Добавка же латекса способствует усилению сцепления даже при данных жестких условиях испытания. Весьма важно предотвратить коагуляцию латексов, которая способствует снижению прочности сцепления при переменном увлажнении и высушивании.

Растворы с латексом СКС-65 ГП, имея величину усадки, близкую к пенобетону, практически не испытывают сдвигающих усилий в контактной зоне. Наблюдается и дополнительная гидратация цемента, особенно при малых П:Ц. Об этом свидетельствует повышение прочности сцепления в составах с П:Ц=0,07 и понижение прочности при П:Ц=0,15÷0,20.

Отмечается некоторое повышение прочности сцепления поризованного раствора с пенобетоном при переменном увлажнении и высушивании, а затем, к 55-му циклу, наблюдается ее быстрое снижение. В наших опытах через 50 циклов снижение прочности не превышает 1/3 достигнутого максимума у составов с П:Ц=0,10.

После длительных испытаний пенобетон начинает шелушиться, а на поверхности раствора появляются мелкие каверны кавитационного типа. В месте контакта при визуальном осмотре видимых изменений не обнаружено.

Изучение влияния температуры окружающей среды на полимерцементный раствор показало, что установленное снижение прочности и модуля упругости объясняется размягчением полимерной фазы и переходом ее в высокоэластичное состояние. Учитывая такую особенность полимерцементных составов, нами проверено изменение прочности при температуре: +20; +50; +70; +90 и +100°С. Фактически защитно-отделочный слой под действием солнечных лучей может нагреваться на фасаде здания до температуры около +70°С. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице.

| Полимер  | П:Ц  | Прочность при сжатии (МПа) в условиях температур |       |       |       |        |
|----------|------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|
|          |      | +20°С                                            | +50°С | +70°С | +90°С | +110°С |
| –        | 0    | 4,2                                              | 4,8   | 4,5   | 4,2   | 4,6    |
| ПВАД     | 0,07 | 5,7                                              | 5,3   | 5,3   | 5,9   | 4,9    |
|          | 0,10 | 7,6                                              | 7,8   | 6,4   | 6,4   | 5,7    |
|          | 0,20 | 11,8                                             | 8,2   | 6,1   | 5,6   | 5,6    |
| СКС-65ГП | 0,07 | 4,5                                              | 4,7   | 4,5   | 4,4   | 3,9    |
|          | 0,10 | 5,9                                              | 5,6   | 5,0   | 5,8   | 4,8    |
|          | 0,20 | 5,6                                              | 3,5   | 3,2   | 2,9   | 2,7    |

Как видно из таблицы, при увеличении П:Ц во всех составах, в том числе и при температуре +70°С, происходит размягчение полимерной фазы, приводящее к снижению прочности при сжатии. Так, у состава с СКС-65ГП при П:Ц от 0,07 до 0,10 это снижение составляет 0,5 МПа, что не столь существенно, особенно при низких температурах, и его можно считать не опасным для долговечности защитно-отделочных покрытий из пенополимерцементных растворов указанного состава. Вместе с тем снижение модуля упругости оказывает благоприятное воздействие на трещиностойкость защитного покрытия вследствие улучшения физических свойств данного материала при восприятии им растягивающих напряжений. Такой материал лучше будет работать на воздействие усадочных напряжений, что свидетельствует о его деформативности и, следовательно, долговечности.

## Выводы

Полученные защитно-отделочные растворы в наиболее полной мере отвечают всему набору требований, предъявляемых к защитным растворам, что позволяет сделать заключение об их хорошей атмосферостойкости.

## Список литературы

1. Кочеткова, М.В. Предпосылки к выбору оптимальных композиций пенополимерцементных составов для защитно-отделочных покрытий стен из пенобетона / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, Е.С. Аленкина // Современная техника и технологии. – 2014. – №12 (40). – С. 115–118.
2. Гусев, Н.И. Прочностные показатели полимерцементных композитов для наружного покрытия стен из пенобетона / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №4. – С. 36–40.
3. Гусев, Н.И. Прочность сцепления пенополимерцементных растворов с пенобетонными наружными стенами отапливаемых зданий / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №4. – С. 52–57.
4. Гусев, Н.И. Методика исследований физико-механических свойств пенополимерцементных растворов для защиты наружных стен из пенобетона / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, А.С. Щеглова // Современная техника и технологии. – 2014. – №12(40). – С. 36–40.
5. Гусев, Н.И. Выполнение строительных процессов с применением растворов и бетонов / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, Е.С. Аленкина // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5–1 (37). – С. 20.
6. Гусев, Н.И. Пенополимерцементные композиты на защите легкого бетона стен от воздействия окружающей среды / Н.И. Гусев, А.С. Щеглова // Современная техника и технологии. – 2014. – №11(39). – С. 97–99.

## References

1. Kochetkova, M.V. Prerequisites for the selection of optimal compositions foam polymer compositions for protective and decorative coatings wall of foam / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, E.S. Alenkina // Modern techniques and technologies. – 2014. – №12 (40). – P. 115–118.
2. Gusev, N.I. Strength characteristics of polymer-matrix composites for the outer coating of the walls of the foam / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №4. – P. 36–40.
3. Gusev, N.I. Adhesion strength foam polymer solutions with foam concrete exterior walls of heated buildings / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №4. – P. 52–57.
4. Gusev, N.I. The research methodology of physical and mechanical properties foam polymer solutions to protect the outer walls of foam / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, A.S. Shcheglova // Modern techniques and technologies. – 2014. – №12 (40). – P. 36–40.
5. Gusev, N.I. Execution of construction processes using mortars and concretes / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, E.S. Alenkina // Modern scientific research and innovation. – 2014. – № 5–1 (37). – P. 20.
6. Gusev, N.I. Foam polymer composites on protection of light concrete walls from the environment / N.I. Gusev, A.S. Shcheglova // Modern techniques and technologies. – 2014. – №11 (39). – P. 97–99.

## УДК 691.535

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

**Жегера Кристина Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: jegera@yandex.ru

**Пышкина Ирина Сергеевна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: glazycheese@gmail.com

**Рыжов Антон Дмитриевич**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: penza48@yandex.ru

**Живаев Александр Александрович**,  
кандидат технических наук, ООО «НПП  
«Геотек»  
E-mail: zhivaev@npp-geotek.ru

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

**Zhegera Christina Vladimirovna**,  
post graduate of the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: jegera@yandex.ru

**Pyshkina Irina Sergeevna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: glazycheese@gmail.com

**Ryzhov Anton Dmitrievich**,  
Postgraduate of the department «Quality  
management and construction technologies»  
E-mail: penza48@yandex.ru

**Zhivaev Alexander Alexandrovich**,  
candidate of technical science, ООО «НПП  
«Геотек»  
E-mail: zhivaev@npp-geotek.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ РАСТВОРНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ\*

К.В. Жегера, И.С. Пышкина, А.Д. Рыжов, А.А. Живаев

Приведены сведения о методике оценки прочности сцепления на сдвиг растворного слоя. Описаны методика и приборное обеспечение для оценки прочности сцепления.

*Ключевые слова:* сухие строительные смеси, растворный слой, прочность сцепления, оценка, методика

## METHOD OF ASSESSMENT ADHESION STRENGTH OF SOLUTION LAYER BASED ON DRY MIXES

C.V. Zhegera, I.S. Pyshkina, A.D. Ryzhov, A.A. Zhivaev

Some information about the methodology to assess the shear bond strength of mortar layer is given. The methodology and instrumentation for assessing the strength of adhesion are described.

*Keywords:* dry mixes, adhesive strength, technique

Одним из требований к растворам на основе сухих строительных смесей (ССС) является прочность сцепления с основанием. В соответствии с действующими стандартами серии DIN EN существующая методика определения прочности сцепления предусматривает отрыв растворного слоя от подложки [1, 2]. Между тем, растворный слой в процессе эксплуатации испытывает также и сдвиговые нагрузки относительно подложки [3].

На сегодня методика определения прочности сцепления на сдвиг растворных слоев на основе СССР фактически отсутствует.

Методика определения сопротивления при сдвиге при испытании грунтов предусматривает применение прибора ГТ 2.2.3 производства ООО «НПП «Геотек»» [4] (рис. 1).

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части.



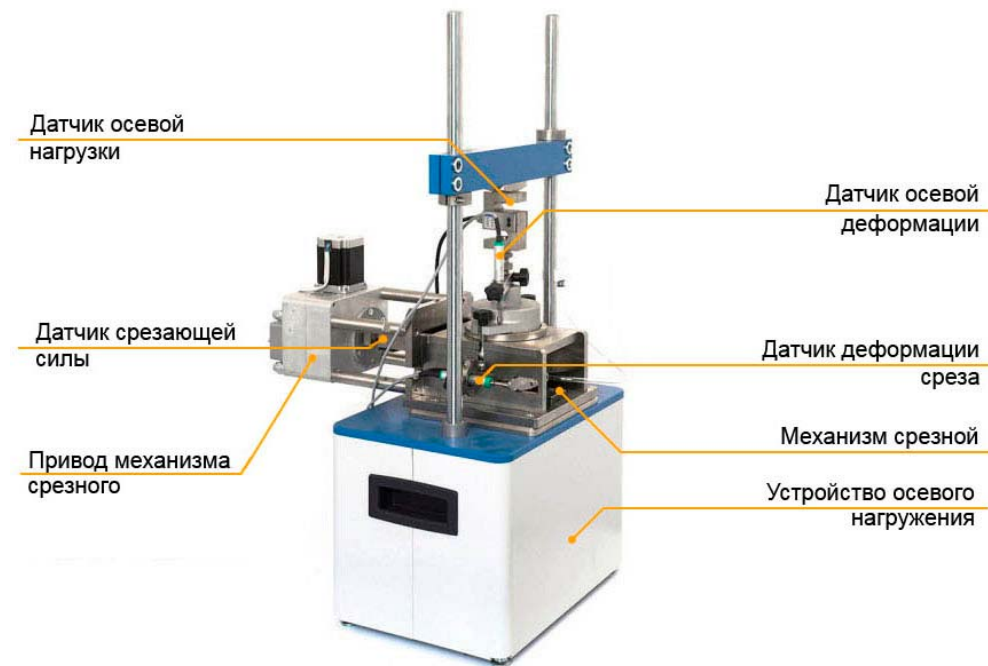


Рис. 1. Внешний вид прибора ГТ 2.2.3

Принцип работы прибора ГТ 2.2.3 заключается в создании в испытательной установке горизонтальной сдвигающей нагрузки на образец на основе исследуемого состава. Усилие, создаваемое редуктором, передается подвижной каретке срезной коробки и измеряется датчиком силы.

Испытываемый образец помещается в каретку прибора таким образом, чтобы подложка находилась в малом срезном кольце, а исследуемый состав – в большом срезном кольце. Технологический зазор размером 1 мм образует область среза. В процессе испытаний при увеличении касательной нагрузки, применяемой к нижнему срезному кольцу, фиксируется значение деформаций сдвига исследуемого состава относительно подложки.

Указанную методику и прибор ГТ 2.2.3 использовали для определения прочности сцепления на сдвиг растворного слоя относительно подложки. Для испытаний применялась ССС «ЮНИС».

При испытаниях использовались подложки из пенобетона цилиндрической формы, геометрические размеры которых составляют 71,4×15 мм. На подложку наносили исследуемый состав плиточного клея толщиной 5 мм [5].

Испытание образцов проходило по схеме, представленной на рис.2.

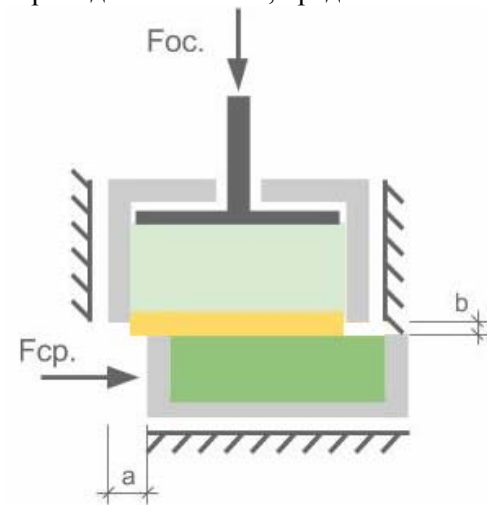


Рис. 2. Схема испытания исследуемых образцов на срез

Принималась скорость сдвига растворного слоя на основе плиточного цементного клея, равная 0,2 мм/мин. При применении ССС на известковых, гипсовых вяжущих скорость сдвига должна быть скорректирована.

Результаты испытания растворного слоя на основе плиточного цементного клея на подложке из пенобетона представлены на рис.3 и рис.4.

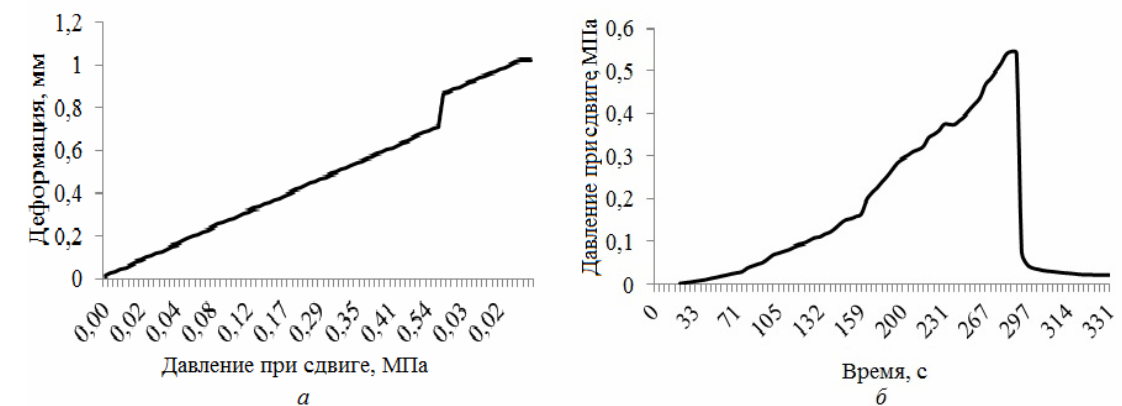
Рис. 3. Испытание на сдвиг плиточного клея на цементной основе:  
а – значение деформации; б – давление при сдвиге

Рис. 4. Образец плиточного клея на цементной основе после проведения испытания

Установлено, что прочность сцепления на сдвиг исследуемого слоя составляет 0,55 МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к адгезионной прочности клеевого слоя [6].

Статистическая обработка полученных результатов подтвердила высокую сходимость полученных результатов.

#### Выводы

Как видно, приведенные исследования показали возможность применения предлагаемой методики и приборного обеспечения для определения прочности сцепления на сдвиг растворного слоя на основе ССС.

## Список литературы

1. DIN EN 1348:2007 Растворы и клеи для керамической плитки. Определение прочности сцепления с основанием цементосодержащих растворов для внутренних и наружных работ. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 10с.
2. ГОСТ 31357–2007 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия. – М.: Изд-во ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 12с.
3. Оценка напряженного состояния отделочного слоя на основе состава с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина [и др.] // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 71.
4. Пат. 2132545 Российская Федерация, МПК G01N3/24, E02D1/00. Сдвиговый прибор / Болдырев Г.Г., Хрянина О.В.; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный архитектурно-строительный институт; заявл. 22.07. 1996; опубл. 27.06.1999. – 4 с.
5. DIN EN 12004 (2012–09) Растворы и клеи для керамической плитки. Требования, оценка соответствия, классификация и обозначение. – М.: Изд-во ФГУП «Стандартинформ», 2012. – 29 с.
6. DIN EN 12004:2007 Растворы и клеи для керамической плитки. Требования, оценка соответствия, классификация и обозначение. – М.: Изд-во ФГУП «Стандартинформ», 2012. – 27 с.

## References

1. DIN EN 1348: 2007 Mortar and adhesives for ceramic tiles. Determination of adhesion to the base of cement solutions for indoor and outdoor use. – M.: Publishing House of Standards, 2007. – 10 p.
2. GOST 31357 – 2007 Mixtures of dry cement binder. General specifications. – M.: Publishing house FSUE «Standartinform», 2008. – 12 p.
3. Evaluation of the stress state of the finishing layer based on the composition using synthesized aluminosilicate / V.I. Loganina [and al] // Academic Gazette UralNIIProekt RAASN. – 2014. – № 2. – P.71.
4. Pat. 2132545 Russian Federation, IPC G01N3 / 24, E02D1 / 00. The shift device / Boldyrev G.G., Hryanina O.V.; applicant and patentee Penza State Architecture and Construction Institute; appl. 22.07. 1996; publ. 27/06/1999. – 4 p.
5. DIN EN 12004 (2012–09) Mortars and adhesives for ceramic tiles. Requirements, evaluation of conformity, classification and designation. – M.: Publishing house FSUE «Standartinform», 2012. – 29 p.
6. DIN EN 12004:2007 Mortar and adhesives for ceramic tiles. Requirements, evaluation of conformity, classification and designation. – M.: Publishing house Federal State Unitary Enterprise «Standartinform», 2012. – 27 p.

## УДК 691.175

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

**Гусев Николай Иванович**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
**Кочеткова Майя Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: M.V.Kochetkova@mail.ru  
**Аюпова Зарема Венеровна**,  
студентка

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

**Gusev Nikolai Ivanovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department «Quality management and  
Technology of construction production»  
**Kochetkova Maya Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Quality management and  
technology of building production»  
E-mail: M.V.Kochetkova@mail.ru  
**Aiupova Zarema Venerovna**,  
student

## ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА ДЛЯ ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ПЕНОБЕТОНА

Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, З.В. Аюпова

Описана методика испытания материала на влагонепроницаемость и паронепроницаемость, а также дана оценка его пригодности для защиты пенобетона.

*Ключевые слова: влагонепроницаемость, форма и размеры капилляров, эффективность поливинилацетатной дисперсии и латекса в защите пенобетона, паронепроницаемость защитного материала*

## MOISTURE AND WATER VAPOR PERMEABILITY OF POLYMER-MODIFIED MORTAR FOR PROTECTIVE FINISH COATING OF FOAM CONCRETE

N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, Z.V. Aiupova

A technique for testing the material for moisture permeability and water vapor permeability as well as an assessment of its suitability for protection of foam concrete.

*Keywords: moisture permeability, shape and size of the capillaries, effectiveness of polyvinyl acetate dispersion and latex in foam protection, water vapor permeability of protective material*

Влагонепроницаемость, зависящая, как и водопоглощение, от формы и размеров пор и капилляров, имеет решающее значение в оценке пригодности материала в качестве защитно-отделочного покрытия. Было показано, что водонепроницаемость полимерцементного раствора становится тем меньше, чем больше может набухать полимер при контакте с водой. ПВАД, обладая способностью к набуханию, подвержена и вымыванию. Менее водонепроницаемы каучукцементы. Были получены водонепроницаемые каучукцементные образцы состава 1:1 при П:Ц = 0,10.

Влагонепроницаемость растворов определялась при капиллярном подсосе. Образцы после изготовления обтачивали до правильной геометрической формы. Цементнополимероводную пленку с поверхности раствора сциклевали. Боковые грани изолировали мастикой. Толщина фактурного слоя была у всех образцов 18 мм. Образцы

погружали в воду фактурным слоем на глубину 13 мм и устанавливали на подставки. Через 24 и 48 часов фактурный слой скалывали после удаления мастики и определяли весовую влажность пенобетона, примыкающего слоем 3 см к сколотому слою. Температура, влажность в помещении, а также уровень воды в ванне поддерживались постоянными. Результаты опыта приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

| Полимер  | Полимерцементное отношение П:Ц | Влажность пенобетона в % после водонасыщения в течение: |          |
|----------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|
|          |                                | 24 часов                                                | 48 часов |
|          | 0                              | 29,7                                                    | 32,0     |
| ПВАД     | 0,07                           | 5,5                                                     | 9,9      |
|          | 0,10                           | 0,3                                                     | 4,1      |
|          | 0,20                           | 0                                                       | 2,3      |
| СКС-65ГП | 0,07                           | 20                                                      | 26,2     |
|          | 0,10                           | 21,6                                                    | 27,7     |
|          | 0,20                           | 23,8                                                    | 27,5     |

Образцы без полимера имеют высокую влагонепроницаемость.

Интенсивно снижается влагонепроницаемость при добавке ПВАД, особенно когда П:Ц более 0,10. В течение первых двух суток раствор остается практически влагонепроницаемым. Но, как уже отмечалось, составы с ПВАД имеют в 5–6 раз меньшее водопоглощение лишь в начальный период. При более длительном нахождении поливинилацетатных растворов в воде водопоглощение, а следовательно, и влагонепроницаемость возрастают. Так, уже через 48 часов влажность пенобетона была почти в 10 раз больше, чем за первые 24 часа.

Раствор с латексом СКС-65ГП при П:Ц от 0,10 до 0,15 в первые 24 часа более влагонепроницаем, чем с ПВАД. Так, за первые 24 часа накопление влаги пенобетоном составило около 2,5 %, однако во вторые 24 часа оно возросло лишь на 1 %. Весьма значительно повышается влагонепроницаемость в результате коагуляции латекса.

Согласно СН-277-70 через 24 часа влажность пенобетона в граничном слое при объемной массе 500–700 кг/м<sup>3</sup> должна быть не более 10 %, а при объемной массе 800–900 кг/м<sup>3</sup> – не более 8 %. В нашем случае даже через 48 часов увлажнения пенобетон с объемной массой 730 кг/м<sup>3</sup> с защитным покрытием 18 мм из пенополимерцементного раствора с П:Ц от 0,10 до 0,15 имел влажность 3–4 %. Таким образом, изучаемый раствор с СКС-65ГП удовлетворяет требованиям, предъявляемым к защитным покрытиям.

Одним из важнейших свойств, которым должен обладать материал, используемый в качестве защитно-отделочного покрытия, является паронепроницаемость. Сам пенобетон обладает высокой паронепроницаемостью, что приводит к прониканию паров влаги из помещения в ограждающую конструкцию. Кроме того, конструкции, поступающие на монтаж, имеют собственную влажность 18–30 %. Поэтому быстрое удаление влаги из стен возможно только при хорошей паронепроницаемости защитно-отделочного покрытия. Низкая паронепроницаемость защитного слоя способствует появлению больших градиентов влажности и последующих деформаций по сечению стены. Особенно много влаги может накопиться в осенний период, а наступающие затем отрицательные температуры приводят к размораживанию пенобетона и интенсивному росту коррозии арматуры. Вот почему защитное покрытие должно обеспечивать высыхание конструкции до сорбционной влажности и влажностный режим стен согласно требованиям СНиПов. На основании этих требований РСН 29-68 устанавливает коэффициент паронепроницаемости для наружных защитно-отделочных слоев не менее 0,011 мг/м·час·Па.

По данным наших исследований коэффициент паронепроницаемости пенобетона с плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> равен 0,19 мг/м·час·Па.

Паронепроницаемость пенополимерцементных растворов определяли на образцах после 28-суточного воздушно-сухого твердения, герметизировали в стальных обой-

мах-стаканах, которыми накрывали бьюксы с дистиллированной водой. Комплект образцов помещали в полугерметичный шкаф, где были установлены термометр, психрометр и барометр. Для поддержания требуемой влажности в шкаф помещали прокаленный хлористый кальций, который периодически заменяли свежим. Таким образом, в шкафу поддерживалась постоянная температура +19 – +20°С и влажность 50–55 %. Бьюкс с водой взвешивали через каждые 24 часа с точностью до 1 мг. Опыт прекращали после достижения одинакового среднечасового уменьшения воды в бьюксе. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

| Полимер  | Полимерцементное отношение П:Ц | Объемная масса, кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент паронепроницаемости, мг/м·час·Па |
|----------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
|          | 0                              | 1455                              | 0,091                                        |
| ПВАД     | 0,07                           | 1555                              | 0,063                                        |
|          | 0,10                           | 1540                              | 0,045                                        |
|          | 0,20                           | 1550                              | 0,031                                        |
| СКС-65ГП | 0,07                           | 1420                              | 0,084                                        |
|          | 0,10                           | 1510                              | 0,012                                        |
|          | 0,15                           | 1550                              | 0,010                                        |
|          | 0,20                           | 1550                              | 0,002                                        |

Как видно из табл. 2, паронепроницаемость раствора с увеличением количества полимера уменьшается. Для растворов с П:Ц от 0,07 до 0,15 паронепроницаемость находится в пределах допустимого. Растворы с латексом по мере увеличения количества полимера менее паронепроницаемы, чем с добавкой ПВАД.

Однако поризованный раствор на основе латекса с П:Ц до 0,12 однозначно может быть применен в качестве защитно-отделочного покрытия пенобетонных стен.

Список литературы

1. Кочеткова, М.В. Предпосылки к выбору оптимальных композиций пенополимерцементных составов для защитно-отделочных покрытий стен из пенобетона / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, Е.С. Аленкина // Современная техника и технологии. – 2014. – №12 (40). – С. 115–118.

2. Гусев, Н.И. Прочностные показатели полимерцементных композитов для наружного покрытия стен из пенобетона / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №4. – С. 36–40.

3. Гусев, Н.И. Прочность сцепления пенополимерцементных растворов с пенобетонными наружными стенами отапливаемых зданий / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, К.С. Паршина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №4. – С. 52–57.

4. Гусев, Н.И. Методика исследований физико-механических свойств пенополимерцементных растворов для защиты наружных стен из пенобетона / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, А.С. Щеглова // Современная техника и технологии. – 2014. – №12(40). – С. 36–40.

5. Гусев, Н.И. Выполнение строительных процессов с применением растворов и бетонов / Н.И. Гусев, М.В. Кочеткова, Е.С. Аленкина // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5–1 (37). – С. 20.

6. Гусев, Н.И. Пенополимерцементные композиты на защите легковесных стен от воздействия окружающей среды / Н.И. Гусев, А.С. Щеглова // Современная техника и технологии. – 2014. – №11(39). – С. 97–99.

## References

1. Kochetkova, M.V. Prerequisites for the selection of optimal compositions penopolimertsementnyh compositions for protective and decorative coatings wall of foam / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, E.S. Alenkina // Modern techniques and technologies. – 2014. – №12 (40). – P. 115–118.
2. Gusev, N.I. Strength characteristics of polymer-matrix composites for the outer coating of the walls of the foam / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №4. – P. 36–40.
3. Gusev, N.I. Adhesion strength foam polymer solutions with foam concrete exterior walls of heated buildings / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №4. – P. 52–57.
4. Gusev, N.I. The research methodology of physical and mechanical properties foam polymer solutions to protect the outer walls of the foam / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, A.S. Shcheglova // Modern techniques and technologies. – 2014. – №12 (40). – P. 36–40.
5. Gusev, N.I. Execution of construction processes using mortars and concretes / N.I. Gusev, M.V. Kochetkova, E.S. Alenkina // Modern scientific research and innovation. – 2014. – № 5–1 (37). – P. 20.
6. Gusev, N.I. Foam polymer concrete composites Protection of light concrete walls from the environment / N.I. Gusev, A.S. Shcheglova // Modern techniques and technologies. – 2014. – №11 (39). – P. 97–99.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 539.3

Хмельницкий национальный университет  
Украина, 29016, г. Хмельницкий,  
ул. Институтская, 11

**Максимчук Диана Николаевна,**  
преподаватель, аспирант кафедры «Высшая  
математика»  
E-mail: rudvb@ukr.net

Khmelnytsky National University  
Ukraine, 29016, Khmelnytsky, 11, Institute St.

**Maximchuk Diana Nikolayevna,**  
Lecturer, Postgraduate of the department  
«Higher Mathematics»  
E-mail: rudvb@ukr.net

### ОСЕСИММЕТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУХ СООСНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШТАМПОВ, КОТОРЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ С ШАРОМ С НАЧАЛЬНЫМИ (ОСТАТОЧНЫМИ) НАПРЯЖЕНИЯМИ

Д.Н. Максимчук

В рамках линеаризованной теории упругости рассмотрена смешанная задача о давлении упругих цилиндрических штампов на слой с начальными напряжениями. Исследования выполнены в общем виде для теорий больших начальных деформаций и различных вариантов теорий малых начальных деформаций при произвольной структуре упругого потенциала.

*Ключевые слова:* упругий потенциал, упругий цилиндр, упругий слой с начальными (остаточными) напряжениями

### AXIS-SYMMETRICAL CONTACT INTERACTION OF RESILIENT RECTANGULAR DIE AND A HALF PLANE WITH INITIAL (RESIDUAL) TENSION

D.N. Maksimchuk

The paper deals with the mixed type task of measuring pressure of an elastic cylinders dies upon a layer with initial stresses within the framework of linear elasticity theory. In general, the research was carried out for the theory of great initial deformations and different variants of the theory of small initial deformations with arbitrary structure of elastic potential.

*Keywords:* elastic potential, elastic cylinder, elastic layer with initial (residual) stresses

В рамках линеаризованной теории упругости [1–3] приводится решение смешанной задачи о давлении упругих цилиндрических соосных штампов с начальными

(остаточными) напряжениями на упругий слой с начальными (остаточными) напряжениями (рис. 1).

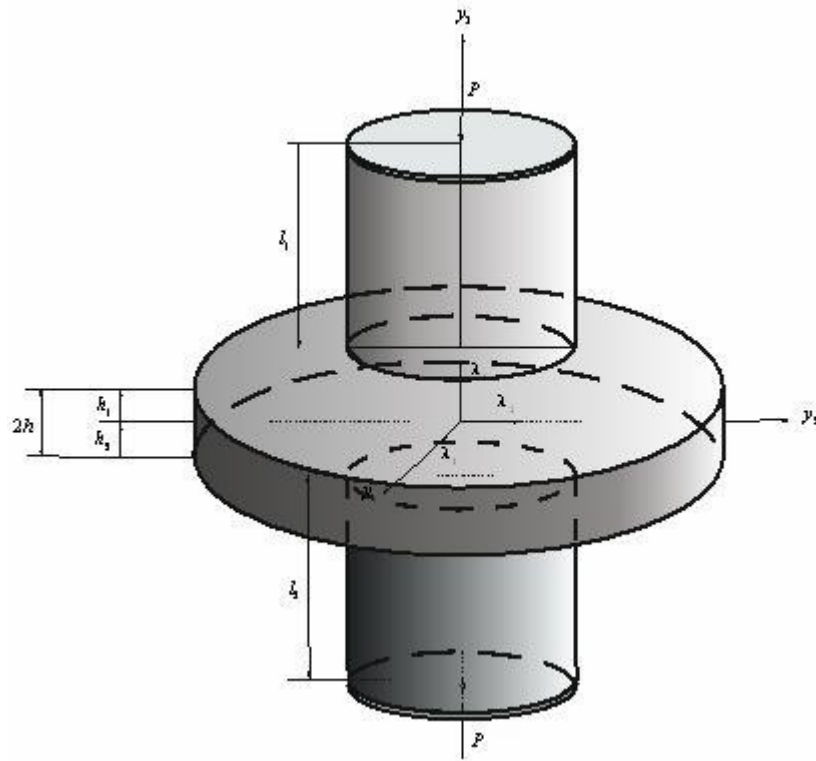


Рис. 1. Давление соосных штампов на слой с начальными (остаточными) напряжениями

Исследования выполнены в общем виде для теорий больших (конечных) начальных деформаций и различных вариантов теорий малых начальных деформаций при произвольной структуре упругого потенциала. Предполагается, что упругие потенциалы – дважды непрерывно-дифференцируемые функции алгебраических инвариантов тензора деформации Грина. Все исследования проведены в координатах начального деформированного состояния  $y_i$ , которые связаны с лагранжевыми координатами естественного состояния отношениями  $y_i = \lambda_i x_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ), где  $\lambda_i$  – коэффициенты удлинения, определяющие перемещения начального состояния в цилиндрах и слое.

Кроме того, предположим, что действие штампа вызывает в слое малое возмущение основного напряженно-деформированного состояния, для которого выполняются условия

$$S_0^{11} = S_0^{22} \neq 0 \quad S_0^{33} = 0 \quad \lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3.$$

Рассмотрим упругий предварительно напряженный слой, в который вдавливаются два соосных упругих цилиндрических штампа (см. рис. 1). Предполагаем, что слой изготовлен из сжимаемого или несжимаемого изотропного материала. В случае ортотропных материалов будем считать, что упруго-эквивалентные напряжения совпадают с направлениями осей координат. Обозначим толщину слоя после возникновения там начальных напряжений  $h_1 = \lambda_1 h_2$  ( $h_2$  – толщина слоя до возникновения в нем начальных напряжений);  $R_j, H_j$  – соответственно радиусы и высоты упругих штампов (для «верхнего» штампа  $j = 1$ , а для «нижнего»  $j = 2$ ). Рассматриваемой задаче соответствуют граничные условия:

на торцах упругих штампов

$$u_z^{(1)} = -\varepsilon_+; \quad \tau_r^{(1)} = 0; \quad \forall(r) \in [0, R_1], \quad y_3 = h + l_1, \quad (1)$$

$$u_z^{(2)} = -\varepsilon_-; \quad \tau_{rz}^{(2)} = 0; \quad \forall(r) \in [0, R_2], \quad y_3 = -h - l_2; \quad (2)$$

на боковой поверхности упругих штампов

$$\sigma_z^{(1)} = 0; \tau_{rz}^{(1)} = 0; \forall (y_3) \in [0, l_1], r = R_1, \quad (3)$$

$$\sigma_z^{(2)} = 0; \tau_{rz}^{(2)} = 0; \forall (y_3) \in [0, l_2], r = R_2, \quad (4)$$

на границе упругого слоя в области контакта

$$u_3 = u_z^{(1)}; \tilde{Q}_{33} = \sigma_z^{(1)}; \tilde{Q}_{3r} = t_{rz}^{(1)} = 0, \forall(r) \in [0, R_1], y_3 = -h_1, \quad (5)$$

$$u_3 = u_z^{(2)}; \tilde{Q}_{33} = \sigma_z^{(2)}; \tilde{Q}_{3r} = t_{rz}^{(2)} = 0, \forall(r) \in [0, R_2], y_3 = -h_2, \quad (6)$$

на границе упругого слоя вне области контакта

$$\tilde{Q}_{33} = \tilde{Q}_{3r} = 0, \quad \forall(r) \in [r, +\infty], \quad y_3 = \pm h. \quad (7)$$

Величины перемещений и напряжений, обозначенные индексом (1), принадлежат «верхнему» штампу, индексом (2) – «нижнему» штампу. Соответственно коэффициенты Пуассона и модуль Юнга  $\nu_1, E_1$  – «верхний» штамп;  $\nu, E$  – слой;  $\nu_2 E$  – «нижний» штамп.

Условия (1)–(7) приводят к следующим выражениям для перемещений и напряжений на границах слоя с начальными напряжениями:

при  $y_3 = +h_1$

$$u_3 = \frac{1}{\omega_2 \chi} \int_0^\infty Q_1(\xi) J_0(\xi_r) d\xi; \quad (8)$$

$$Q'_{33} = \omega_3 \int_0^\infty q_1(\xi) J_0(\xi_r) d\xi;$$

при  $y_3 = -h_1$

$$u_3 = \frac{1}{\omega_2 \chi} \int_0^\infty Q_2'(\xi) J_0(\xi r) d\xi; \quad (9)$$

$$Q'_{33} = \omega_3 \int_0^\infty q_2(\xi) J_0(\xi_r) d\xi,$$

где

$$Q_1'(\xi) = \frac{q_1 - q_2}{\xi} z_1(\xi) + q_1 \frac{1 - z_{12}(\xi)}{\xi}; \quad (10)$$

$$Q_2'(\xi) = \frac{q_1 - q_2}{\xi} z_1(\xi) - q_2 \frac{1 - z_{12}(\xi)}{\xi};$$

$$z_1(\xi) = \begin{cases} \frac{sh2\varphi_1 - \frac{2}{\chi}\varphi_1 ch2\varphi_1}{sh^2 2\varphi_1 - \left(\frac{2\varphi_1}{\chi}\right)^2}, n_1 = n_2; \\ \frac{s_3 \frac{ch2\varphi_2}{sh2\varphi_1} - s}{(sch\varphi_2 - s_3 sh\varphi_2 cth\varphi_1)(ssh\varphi_2 - s_3 ch\varphi_2 th\varphi_1)}, n_1 \neq n_2; \end{cases} \quad (11)$$



$$z_2(\xi) = \begin{cases} \frac{1 - e^{-2\varphi_1} - \frac{2}{\chi}\varphi_1}{sh2\varphi_1 - \frac{2}{\chi}\varphi_1}, n_1 = n_2; \\ \frac{ssh\varphi_2 - sh\varphi_2(1 + s_3cth\varphi_1)}{sch\varphi_2 - s_3sh\varphi_2cth\varphi_1}, n_1 \neq n_2; \end{cases} \quad (12)$$

$$q_1(\xi) = \begin{cases} A[ch\varphi_1 - \varphi_1 sh^{-1}\varphi_1] + B[\chi sh\varphi_1 + \varphi_1 ch^{-1}\varphi_1], n_1 = n_2; \\ A[sch\varphi_2 - s_3sh\varphi_2cth\varphi_1] + B[ssh\varphi_2 - s_3ch\varphi_2cth\varphi_1], n_1 \neq n_2; \end{cases} \quad (13)$$

$$q_2(\xi) = \begin{cases} A[\chi ch\varphi_1 - \varphi_1 sh^{-1}\varphi_1] - B[\chi sh\varphi_1 + \varphi_1 ch^{-1}\varphi_1], n_1 = n_2; \\ [sch\varphi_2 - s_3sh\varphi_2cth\varphi_1] - B[sch\varphi_2 - s_3ch\varphi_2th\varphi_1], n_1 \neq n_2; \end{cases} \quad (14)$$

$$A(\xi) = \xi^3 A_2, \quad B(\xi) = \xi^3 B_2(\xi).$$

Напряженно-деформированное состояние в упругих штампах определяем согласно [1] (см. рис. 1).

Удовлетворив граничным условиям (1)–(4), упуская элементарные преобразования, запишем выражения для перемещений и напряжений через новые неизвестные  $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$  для «верхнего» ( $i = 1$ ) и «нижнего» ( $i = 2$ ) упругих штампов:

$$\begin{aligned} u_r^{(i)}(r, y_3) &= \varepsilon_i \left\{ \frac{v_i r}{H_i} \chi_0^{(i)} + \frac{\omega_2}{(1 - 2v_i)} \times \right. \\ &\times \sum_{k=1}^{\infty} [\chi_k^{(i)} F_k(-(1 - 2v_i); 0) \times J_1(\mu_k^{(i)} r) - s_k G_k[2(v_i - 1); 0] \cos \gamma_k z_i] \}; \\ u_3^{(i)}(r, y_3) &= -\varepsilon_i \left\{ 1 + \left( \frac{z_i}{H_i} - 1 \right) \chi_0^{(i)} + \frac{\omega_2}{(1 - 2v_i)} \times \right. \\ &\times \sum_{k=1}^{\infty} [\chi_k^{(i)} F_k[2(v_i - 1); 1] J_0(\mu_k^{(i)} r) - s_k G_k[2(-v_i + 1); -1] \sin \gamma_k z_i] \}; \\ \sigma_z^{(i)}(r, y_3) &= -\varepsilon_i E_i \left\{ \frac{1}{H_i} \chi_0^{(i)} + \frac{\omega_2}{(1 + v_i)(1 - 2v_i)} \times \right. \\ &\times \sum_{k=1}^{\infty} [\mu_k^{(i)} \chi_n^{(i)} F(1; 0) J_0(\mu_k^{(i)} R_i) - \gamma_k^2 s_k G_k(-2; -1) \cos \gamma_n z_i] \}; \\ \tau_{yz}^{(i)}(r, y_3) &= \frac{\varepsilon_i E_i \omega_2}{(1 + v_i)(1 - 2v_i)} \times \\ &\times \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \mu_n^{(i)} \chi_n^{(i)} F_k(0; 1) J_1(\mu_n^{(i)} R_i) + \gamma_k^3 s_n G(0, 0)_i \sin \gamma_k z \right\}; \\ \sigma_r^{(i)}(r, y_3) &= \\ &= -\frac{\varepsilon_i E_i \omega_2}{(1 + v_i)(1 - 2v_i)} \sum_{k=1}^{\infty} \mu_n^{(i)} \chi_n^{(i)} \left[ F_k(-1; 0) J_0(\mu_n^{(i)} R_i) - F_k(2v_i - 2; 0) \frac{J_1(\mu_n^{(i)} R_i)}{\mu_n^{(i)} R_i} \right] + \\ &+ s_n \gamma_n^i \left[ G_n(-1; 1) + \frac{I_1(\gamma_k R_i)}{\gamma_k R_i} (2(1 - v_i) - \gamma_k \frac{I_0(\gamma_k)}{I_1(\gamma_k)}) \right] \cos \gamma_k z_i, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$F_k^{(i)}(t, n) = [ta_n(H_i + t_i - y_3) + \alpha_k^{[i]}(H_i \frac{a_n(y_3 - h_i)}{sh\alpha_n^{(i)} H_i}) + (-1)^n (y_3 - h_i) \times \quad (16)$$

$$\times a_{n+1}(H_i + h_i - y_3) sh^{-1}(\alpha_n^{(i)} H_i); \\ a_0(\chi) = a_2(\chi) = ch\alpha_n^{(i)} \chi; \quad a_1(\chi) = sh\alpha_k^{(i)} \chi;$$

$$G_k^{(i)}(t, n) = I_{n+1}(\gamma_n^{(i)} R_i) + \gamma_k^{(i)} (R_i I_{-n}(\gamma_k^{(i)} R_i) - I_{n+1}(\gamma_k^{(i)} R_i) \times \frac{I_0(\gamma_k^{(i)})}{I_1(\gamma_k^{(i)})}.$$

Положив  $i=1$ , получаем напряжения и перемещения для «верхнего» упругого штампа, при  $i=2$  – для «нижнего» упругого штампа. Постоянные  $A(\xi)$ ,  $B(\xi)$ ,  $\chi_k^{(i)}$  определим из системы парных интегральных уравнений, которые получаем из граничных условий

$$H_0 \left[ \xi^{-1} q_1(\xi) [1 - z_2(\xi) + z_1(\xi)], \xi \rightarrow r \right] = f_1(r) + \int_0^{\infty} \xi^{-1} q_2(\xi) z_1(\xi) J_0(sr) ds, \quad r < R_1; \\ H_0 [q_1(\xi); \xi \rightarrow r] = 0, \quad r > R_1; \quad (17)$$

$$H_0 \left[ \xi^{-1} q_2(\xi) [1 - z_2(\xi) + z_1(\xi)], \xi \rightarrow r \right] = f_2(r) + \int_0^{\infty} \xi^{-1} q_1(\xi) z_1(\xi) J_0(sr) ds, \quad r < R_2;$$

$$H_0 [q_2(\xi); \xi \rightarrow r] = 0, \quad r > R_2,$$

где

$$f_1(r) = -\varepsilon_1 \omega_2 \chi \left[ (1 - \chi_0^{(1)}) - \frac{1}{\omega_2^0} \sum_{k=1}^{\infty} \chi_k^{(1)} J_0(\mu_k^{(1)} r) \right]; \\ f_2(r) = \varepsilon_2 \omega_2 \chi \left[ (1 - \chi_0^{(2)}) - \frac{1}{\omega_2^0} \sum_{k=1}^{\infty} \chi_k^{(2)} J_0(\mu_k^{(2)} r) \right]. \quad (18)$$

Парные интегральные уравнения (17), (18) с помощью процедуры, предложенной в [4], сведены к двум квазирегулярным бесконечным системам алгебраических уравнений.

$$l_k^{(1)} \chi_n^{(1)} + \sum_{k=1}^{\infty} l_{kn}^{(i)} \chi_n^{(i)} = d_k^{(i)}. \quad (19)$$

Решение систем (19) проведено методом редукции, потому что коэффициенты системы (19)  $l_k^{(i)}$ ,  $l_{kn}^{(i)}$  убывают с ростом  $n$ .

Определив постоянные  $\chi_k^{(i)}$  ( $i=1, 2$ ) из систем (19), можно вычислить напряжения и перемещения в упругих штампах и слое с начальными напряжениями по формулам (8)–(16). Отметим, что из полученного решения, в случае потенциалов простейшей структуры (гармонический, Бартенева-Хазановича), можно получить ряд частных случаев, а именно:

а) при  $\lambda_1 = 1$  получаем решение задачи о давлении двух упругих штампов конечной длины на слой без начальных напряжений, решение которой приведено здесь впервые;

б) при  $v_1, v_2 \rightarrow -1$  можно получить решение задачи о давлении двух жестких штампов на слой с начальными напряжениями, решение которой приведено здесь также впервые;

в) при  $v_1, v_2 \rightarrow -1$  и  $\lambda_1 = 1$  получаем решение задачи о давлении двух жестких цилиндрических штампов на слой без начальных напряжений.

На основании анализа и числовых подсчетов можно сделать выводы.

1. Влияние начальных напряжений на напряженно-деформированное состояние упругого штампа состоит в следующем:

а) начальные напряжения в слое и штампах приводят в случае сжатия ( $\lambda_1 < 1$ ) к уменьшению напряжений в упругом штампе, в случае растяжения – к их увеличению, для перемещений картина противоположна;

б) наибольшее влияние начальных напряжений отмечено на боковой поверхности штампа в сечениях  $0 \leq \xi \leq 1$ ;

2. Наличие начальных напряжений в упругом слое и штампах приводит к существенному изменению закона распределения контактных напряжений, при этом в случае сжатия ( $\lambda_1 < 1$ ) контактные напряжения значительно уменьшаются, в случае растяжения ( $\lambda_1 > 1$ ) – увеличиваются, а перемещения в случае сжатия ( $\lambda_1 < 1$ ) значительно возрастают, при растяжении ( $\lambda_1 > 1$ ) – уменьшаются.

3. Обнаружен новый механический эффект: при стремлении начальных напряжений к значениям, соответствующим поверхностной неустойчивости слоя, проявляются эффекты “резонансного” характера не только в слое, но и в упругих штампах, которые заключаются в том, что напряжения и перемещения во взаимодействующих телах резко изменяются (напряжения стремятся к нулю, перемещения неограниченно возрастают).

#### Список литературы

1. Rudnitsky, V.B. Contact interaction of the pre-stressed half-spaces with two elastic punches / V.B. Rudnitsky // Dokl Akad Nauk UkrSSR Ser A:Phys Math Tech Sci (2). – 1987. – №2. – P. 56–61.
2. Guz, A.N. Contact problems for elastic bodies with initial (residual) stresses / A.N. Guz, V.B. Rudnitsky. – Khmelnytskyi, Software the Miller «Scientific editions». – 2004. – P. 682.
3. Guz, A.N. Contact problems for elastic bodies with initial stresses: Focus on Ukrainian research / A.N. Guz, S.Y. Babich, V.B. Rudnitsky // Apple. Mech. Rev.vol 51, nos May. – 1998. – P. 343–371.
4. Guz, A.N. Fundamentals of the contact interaction theory of elastic bodies with initial (residual) stresses / A.N. Guz, V.B. Rudnitsky. – Khmelnytskyi, Software the Miller «Scientific editions». – 2006. – P. 710.

#### References

1. Rudnitsky, V.B. Contact interaction of the pre-stressed half-spaces with two elastic punches / V.B. Rudnitsky // Dokl Akad Nauk UkrSSR Ser A:Phys Math Tech Sci (2). – 1987. – №2. – P. 56–61.
2. Guz, A.N. Contact problems for elastic bodies with initial (residual) stresses / A.N. Guz, V.B. Rudnitsky. – Khmelnytskyi, Software the Miller «Scientific editions». – 2004. – P. 682.
3. Guz, A.N. Contact problems for elastic bodies with initial stresses: Focus on Ukrainian research / A.N. Guz, S.Y. Babich, V.B. Rudnitsky // Apple. Mech. Rev.vol 51, nos May. – 1998. – P. 343–371.
4. Guz, A.N. Fundamentals of the contact interaction theory of elastic bodies with initial (residual) stresses / A.N. Guz, V.B. Rudnitsky. – Khmelnytskyi, Software the Miller «Scientific editions». – 2006. – P. 710.

УДК 666.11

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

**Сорокин Дмитрий Сергеевич**,  
студент

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

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

**Sorokin Dmitry Sergeevich**,  
student

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

## ИСКУССТВЕННЫЕ ПОРИСТЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА

Д.С. Сорокин, В.А. Береговой

Установлено влияние основных сырьевых компонентов на формирование эксплуатационных показателей гранулированного пеностекла из нетрадиционного природного сырья.

*Ключевые слова: пеностекло, пористые заполнители, расширение сырьевой базы, исследование свойств*

## ARTIFICIAL POROUS FILLERS ON THE BASIS OF GRANULATED FOAMGLASS

D.S. Sorokin, V.A. Beregovoy

Influence of main input products on the formation of operational indicators of the granulated foamglass developed from nonconventional raw materials is investigated.

*Keywords: foamglass, porous fillers, expansion of a source of raw materials, research of properties*

Одним из перспективных направлений применения пеностекла, позволяющих использовать основные преимущества этого материала, являются конструкции эксплуатируемых кровель. Для их устройства и последующей эксплуатации необходимо, чтобы материал теплозащитного слоя обладал, с одной стороны, достаточной прочностью, водонепроницаемостью, водостойкостью и негорючестью, а с другой – низкой плотностью и теплопроводностью.

Исходя из этого, цель исследований заключалась в разработке составов пеностекла и их последующей оптимизации по заранее выбранным критериям. Помимо этого решалась техническая задача – получение высокопрочного ячеистого гранулированного материала со стекловидной структурой, формируемой в результате частичного расплава химически модифицированных природных опок.

Общие технологические принципы изготовления исследуемых материалов, включая подбор модификаторов фазового состава, были разработаны ранее и приведены в работах [1, 2].

При постановке экспериментов использовался метод симплекс-решетчатого планирования, позволяющий исследовать совместное влияние трех рецептурных факторов [3].

Фактор №1 – содержание измельченной стекловидной шихты. Шихту получали путем нагрева и выдержки при температуре 850°C смеси, состоящей из природной опоки и добавок-модификаторов следующего состава (% от массы опоки): KNO<sub>3</sub> (3...5); CaO (5...6); K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>CO (18...20).

Фактор № 2 – содержание флюсующей добавки ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{mSiO}_2$ ), обеспечивающей формирование в процессе высокотемпературного вспенивания достаточного количества маловязкого минерального расплава.

Фактор № 3 – содержание в смеси газообразующей добавки, в качестве которой были опробованы природный доломит  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (состав № 1), а также порошок молотого коксующегося угля (состав №2).

Рецептура исследованных составов в кодовом и натуральном выражениях и показатели свойств пеностеклогранулята приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования эксперимента и показатели свойств материала (состав № 1)

| В кодовом выражении |     |     | В натуральном выражении |           |                | $\rho_m$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $W_m$ ,<br>% | $R_{сж}$ ,<br>кгс/см <sup>2</sup> |
|---------------------|-----|-----|-------------------------|-----------|----------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| A                   | B   | C   | Шихта                   | Добавка   |                |                                 |              |                                   |
|                     |     |     |                         | Флюсующая | Газообразующая |                                 |              |                                   |
| 1                   | 0   | 0   | 50                      | 5         | 0              | 1,33                            | 3,93         | 185,19                            |
| 0                   | 1   | 0   | 40                      | 15        | 0              | 0,85                            | 3,64         | 86,30                             |
| 0                   | 0   | 1   | 40                      | 5         | 10             | 1,12                            | 3,93         | 91,85                             |
| 0,5                 | 0,5 | 0   | 45                      | 10        | 0              | 0,93                            | 2,42         | 62,22                             |
| 0,5                 | 0   | 0,5 | 45                      | 5         | 5              | 1,11                            | 1,64         | 95,24                             |
| 0                   | 0,5 | 0,5 | 40                      | 10        | 5              | 0,95                            | 2,96         | 158,3                             |

Уравнения регрессии для исследуемых свойств имеют вид:

$\rho_m = 1,33 \cdot A + 0,851 \cdot B + 1,12 \cdot C - 0,642 \cdot A \cdot B - 0,46 \cdot A \cdot C - 0,142 \cdot B \cdot C$ , (1)

$W_m = 3,93 \cdot A + 3,64 \cdot B + 3,93 \cdot C - 5,476 \cdot A \cdot B - 9,156 \cdot A \cdot C - 3,3 \cdot B \cdot C$ , (2)

$R_{сж} = 185,19 \cdot A + 86,3 \cdot B + 91,85 \cdot C - 294,1 \cdot A \cdot B - 173,12 \cdot A \cdot C + 276,9 \cdot B \cdot C$ . (3)

Влияние отдельных компонентов и их смесей на свойства материала характеризуют графики на рис. 1.

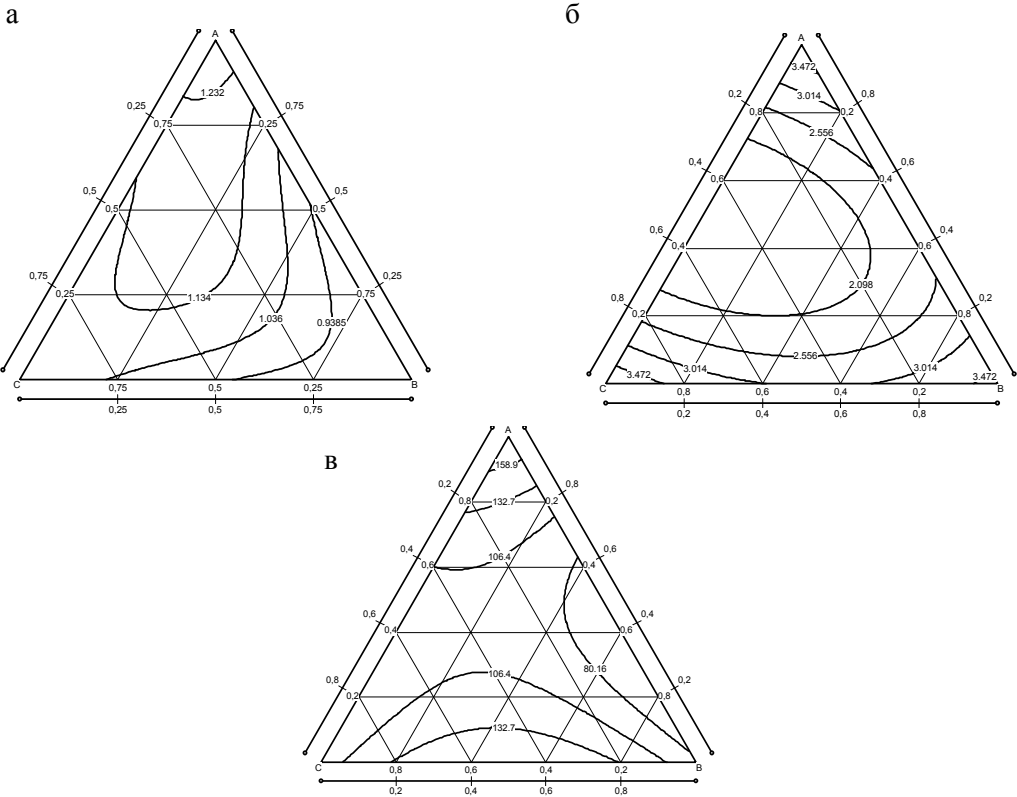


Рис. 1. Влияние компонентного состава на свойства материала:  
а – средняя плотность; б – водопоглощение ; в – прочность на сжатие

В табл. 2 приведены результаты экспериментов, проведенных с целью установления возможности улучшения качества материала путем утилизации при его производстве боя тарного стекла. Для этого к шихте исходного состава дополнительно вводили 30 % порошка из боя стеклотары.

Т а б л и ц а 2

Матрица планирования эксперимента и показатели свойств материала

| В кодовом выражении |     |     | В натуральном выражении |            |                 | $\rho_m$ , г/см <sup>3</sup> | $W_m$ , % | $R_{сж}$ , кгс/см <sup>2</sup> |
|---------------------|-----|-----|-------------------------|------------|-----------------|------------------------------|-----------|--------------------------------|
| A                   | B   | C   | Шихта+30 % стекла       | Добавка    |                 |                              |           |                                |
|                     |     |     |                         | Флю-сующая | Газообра-зующая |                              |           |                                |
| 1                   | 0   | 0   | 50                      | 5          | 0               | 0,946                        | 6,43      | 145,18                         |
| 0                   | 1   | 0   | 40                      | 15         | 0               | 0,762                        | 3,25      | 44,74                          |
| 0                   | 0   | 1   | 40                      | 5          | 10              | 1,084                        | 5,10      | 95,73                          |
| 0,5                 | 0,5 | 0   | 45                      | 10         | 0               | 0,890                        | 4,77      | 72,72                          |
| 0,5                 | 0   | 0,5 | 45                      | 5          | 5               | 1,113                        | 0,89      | 102,77                         |
| 0                   | 0,5 | 0,5 | 40                      | 10         | 5               | 1,073                        | 1,35      | 165,07                         |

После обработки данных, представленных в табл. 2, были получены зависимости исследуемых свойств от соотношения основных компонентов:

$\rho_m = 0,946 \cdot A + 0,762 \cdot B + 1,084 \cdot C + 0,144 \cdot A \cdot B + 0,392 \cdot A \cdot C + 0,6 \cdot B \cdot C$ , (4)

$W_m = 6,43 \cdot A + 3,247 \cdot B + 5,1 \cdot C - 0,274 \cdot A \cdot B - 19,488 \cdot A \cdot C - 11,298 \cdot B \cdot C$ , (5)

$R_{сж} = 145,18 \cdot A + 44,737 \cdot B + 95,726 \cdot C - 88,926 \cdot A \cdot B - 70,7 \cdot A \cdot C + 379,39 \cdot B \cdot C$ . (6)

С использованием зависимостей 4...6 в поле концентрационных треугольников (рис. 2) были построены изолинии показателей свойств для рассматриваемых тройных сырьевых систем.

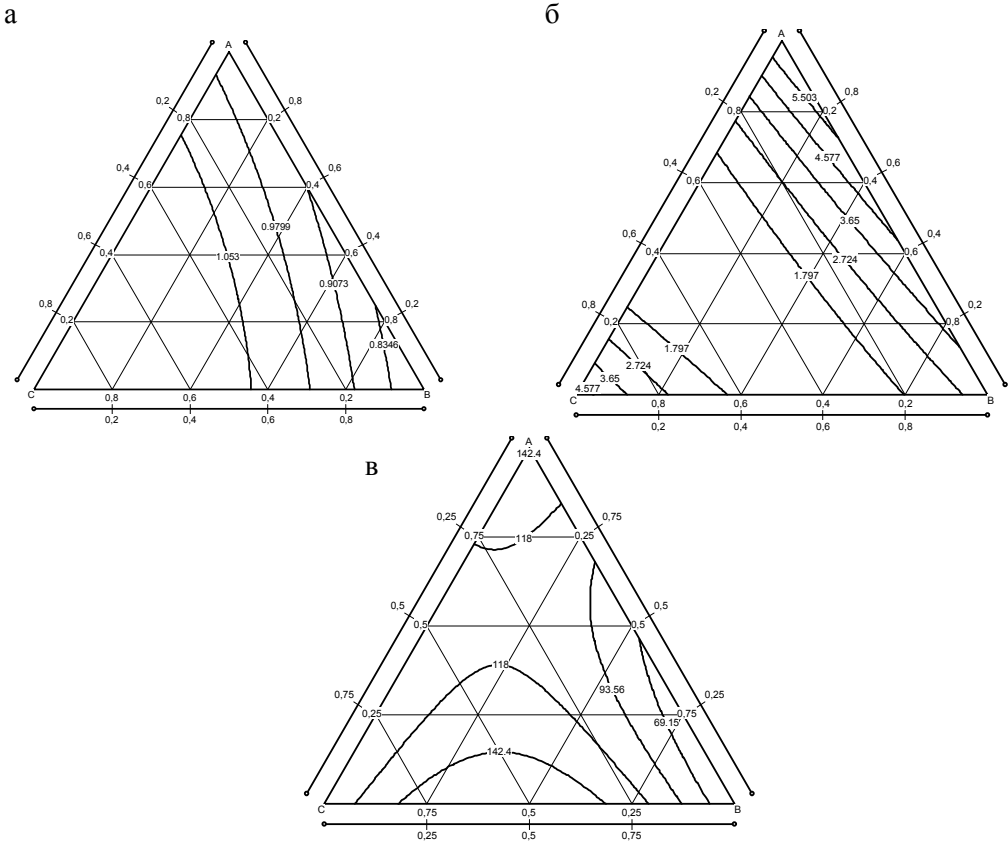


Рис. 2. Влияние компонентного состава на свойства материала:  
а – средняя плотность; б – водопоглощение; в – прочность на сжатие

Анализ полученных данных показывает, что усложнение состава материала путем введения стеклянного наполнителя сопровождается снижением его средней плотности (до 30 %), что приводит к закономерному изменению других исследуемых структурно-зависимых свойств – водопоглощения и прочности.

Влияние вида газообразующей добавки на показатели свойств разрабатываемого материала изучали путем замены доломитового компонента на угольный порошок. Результаты физико-механических испытаний приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Матрица планирования эксперимента и показатели свойств материала (состав № 2)

| В кодовом выражении |     |     | В натуральном выражении |           |                | $\rho_m$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $W_m$ , % | $R_{сж}$ ,<br>кгс/см <sup>2</sup> |
|---------------------|-----|-----|-------------------------|-----------|----------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| А                   | В   | С   | Шихта+30 %<br>стекла    | Добавка   |                |                                 |           |                                   |
|                     |     |     |                         | Флюсующая | Газообразующая |                                 |           |                                   |
| 1                   | 0   | 0   | 25                      | 2,5       | 0,14           | 0,974                           | 1,61      | 169,7                             |
| 0                   | 1   | 0   | 20                      | 7,5       | 0,14           | 0,437                           | 1,37      | 15,5                              |
| 0                   | 0   | 1   | 20                      | 2,5       | 0,34           | 0,889                           | 0,96      | 158,0                             |
| 0,5                 | 0,5 | 0   | 22,5                    | 5         | 0,14           | 0,863                           | 1,40      | 98,08                             |
| 0,5                 | 0   | 0,5 | 22,5                    | 2,5       | 0,25           | 0,822                           | 0,87      | 167,5                             |
| 0                   | 0,5 | 0,5 | 20                      | 5         | 0,25           | 0,782                           | 0,03      | 107,4                             |

Для исследуемых свойств материала уравнения регрессии имеют вид:

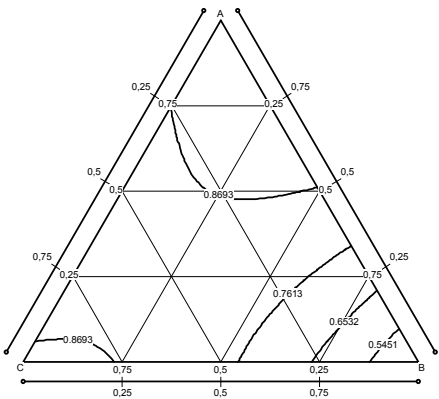
$\rho_m = 0,974 \cdot A + 0,437 \cdot B + 0,889 \cdot C + 0,63 \cdot A \cdot B - 0,438 \cdot A \cdot C + 0,476 \cdot B \cdot C$ , (7)

$W_m = 1,611 \cdot A + 1,374 \cdot B + 0,956 \cdot C - 0,37 \cdot A \cdot B - 1,67 \cdot A \cdot C - 4,552 \cdot B \cdot C$ , (8)

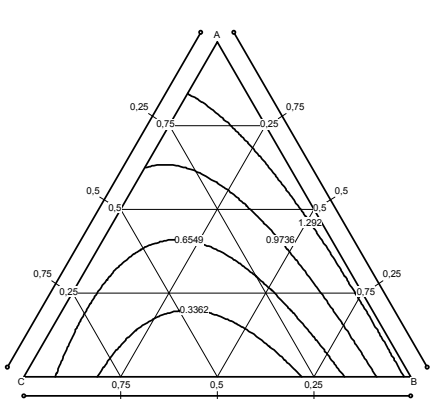
$R_{сж} = 169,75 \cdot A + 15,56 \cdot B + 158,02 \cdot C + 21,694 \cdot A \cdot B + 14,534 \cdot A \cdot C + 82,48 \cdot B \cdot C$ . (9)

Влияние компонентного состава на свойства материала показано на графиках (рис. 3).

а



б



в

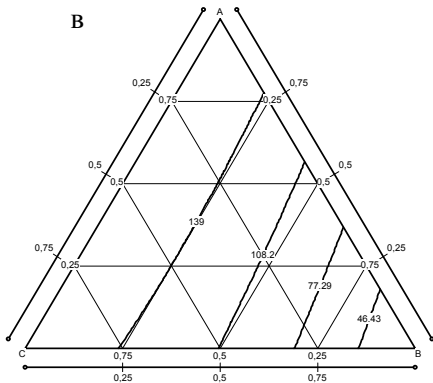


Рис. 3. Влияние компонентного состава на свойства материала:

а – средняя плотность; б – водопоглощение; в – прочность на сжатие

Степень влияния температурного режима процесса вспенивания изучали, изменяя первоначальный режим (равномерное поднятие температуры со скоростью 4 °С/мин и выдержка при достижении максимальной в течение 30 мин) на режим термического удара – мгновенный нагрев до температуры вспенивания с последующей выдержкой в течение 30...40 мин. Результаты опытов с использованием для вспенивания гранул способа «термического удара» приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Матрица планирования эксперимента и показатели свойств материала

| В кодовом выражении |     |     | В натуральном выражении |           |                | $\rho_m$ , г/см <sup>3</sup> | $W_m$ , % | $R_{сж}$ , кгс/см <sup>2</sup> |
|---------------------|-----|-----|-------------------------|-----------|----------------|------------------------------|-----------|--------------------------------|
| А                   | В   | С   | Шихта+30 % стекла       | Добавка   |                |                              |           |                                |
|                     |     |     |                         | Флюсующая | Газообразующая |                              |           |                                |
| 1                   | 0   | 0   | 25                      | 2,5       | 0,14           | 0,621                        | 19,35     | 60,00                          |
| 0                   | 1   | 0   | 20                      | 7,5       | 0,14           | 0,409                        | 5,61      | 37,78                          |
| 0                   | 0   | 1   | 20                      | 2,5       | 0,34           | 0,908                        | 10,34     | 66,67                          |
| 0,5                 | 0,5 | 0   | 22,5                    | 5         | 0,14           | 0,535                        | 3,61      | 22,22                          |
| 0,5                 | 0   | 0,5 | 22,5                    | 2,5       | 0,25           | 0,570                        | 4,95      | 35,56                          |
| 0                   | 0,5 | 0,5 | 20                      | 5         | 0,25           | 0,497                        | 4,38      | 60,00                          |

Уравнения регрессии, полученные в ходе математической обработки экспериментальных данных, имеют вид:

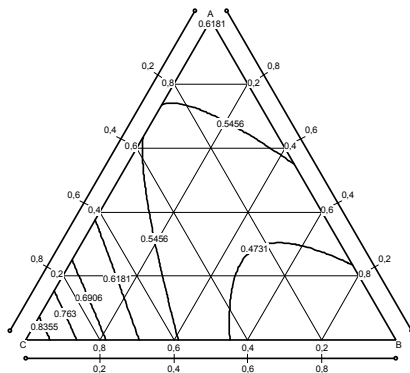
$\rho_m = 0,621 \cdot A + 0,409 \cdot B + 0,908 \cdot C + 0,08 \cdot A \cdot B - 0,778 \cdot A \cdot C - 0,646 \cdot B \cdot C$ , (10)

$W_m = 19,35 \cdot A + 5,607 \cdot B + 10,344 \cdot C - 35,474 \cdot A \cdot B - 39,576 \cdot A \cdot C - 14,382 \cdot B \cdot C$ , (11)

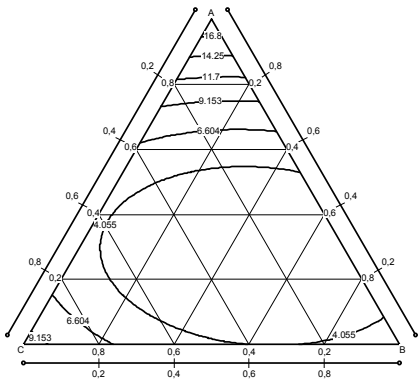
$R_{сж} = 60 \cdot A + 37,78 \cdot B + 66,67 \cdot C - 106,68 \cdot A \cdot B - 111,1 \cdot A \cdot C + 31,1 \cdot B \cdot C$ . (12)

Характер влияния компонентов на свойства материала, формируемого способом термоудара, показан на рис. 4.

а



б



в

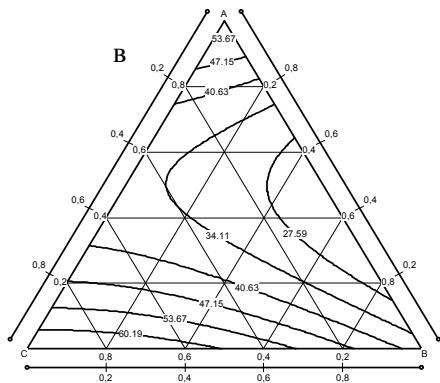


Рис. 4. Влияние компонентного состава на свойства материала, полученного способом термического удара:

а – средняя плотность; б – водопоглощение; в – прочность на сжатие

Сравнение данных, приведенных в табл. 3 и 4, показывает, что режим термической обработки существенно влияет на процессы формирования комплекса эксплуатационных свойств пористого заполнителя на основе гранулированного пеностекла. Так, режим термоудара позволяет снизить величину средней плотности материала аналогичного состава на 30..35 %, вместе с тем он приводит к формированию большего количества сообщающихся ячеек в структуре материала (на это указывает существенный рост показателя водопоглощения).

Таким образом, установлена принципиальная возможность получения высокопрочных искусственных пористых заполнителей с плотностью от 400 до 970 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 3,8...17,0 МПа. Варьируя способ вспенивания и вид используемого газообразователя, можно целенаправленно устанавливать показатели водопоглощения и характер поровой структуры пеностекла из химически модифицированных природных опок.

#### Список литературы

1. Береговой, В.А. Эффективные теплоизоляционные материалы с регулируемым декоративными свойствами на основе опочных горных пород / В.А. Береговой, Д.С. Сорокин, А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 84–88.
2. Береговой, В.А. Стеклокристаллические материалы на основе кремнистых пород / В.А. Береговой, Д.С. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 54–57.
3. Гарькина, И.А. Математическое и компьютерное моделирование при синтезе строительных композитов: состояние и перспективы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 9–13.

#### References

1. Beregovoy, V.A. Effective thermally insulation materials with controlled decorative properties based on flask rocks / V.A. Beregovoy, D.S. Sorokin, A.M. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 2. – P. 84–88.
2. Beregovoy, V. A. Glass-crystal materials on the base of flask rock / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 1. – P. 54–57.
3. Garkina, I.A. Mathematical modeling and simulation at building materials synthesis: state and perspectives / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2010. – № 2. – P. 9–13.

УДК 624.012

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

**Снежкина Ольга Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое моделирование»

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

**Ладин Роман Акбарович**,  
аспирант

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

**Snezhkina Olga Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mathematics and mathematical modeling»

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

**Ladin Roman Akbarovich**,  
Postgraduate

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОРОТКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

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

Предложена методика расчета трещиностойкости коротких железобетонных балок при изменении пролета среза от 0,25 до 1,5 на основе экспериментальных данных.

*Ключевые слова: железобетонные балки, короткие элементы, методика расчета, схемы трещинообразования, усилия трещинообразования*

## EMPIRICAL METHOD CRACKING TOUGHNESS CALCULATING OF SHORT REINFORCED CONCRETE BEAMS

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

The methods of calculating of fracture toughness of short reinforced concrete beams when changing the span of the slice from 0,25 to 1,5 on the basis of experimental data are suggested.

*Keywords: reinforced concrete beams, short elements, calculation methods, schemes of cracking, the effort of cracking*

При проектировании строительных конструкций значительной проблемой является отсутствие в нормативной литературе методики расчета трещиностойкости коротких железобетонных элементов. Ниже предлагается метод расчета трещиностойкости коротких железобетонных балок на основе экспериментальных исследований, проведенных авторами [1, 2] и институтом строительства Голландии (CUR).

Расчет предлагается производить по наклонной граничной трещине, выделяющей наклонные сжатые полосы бетона, и по нормальной трещине в растянутой зоне.

Рассмотрим влияние исследуемых факторов на трещиностойкость наклонных трещин, выделяющих наклонные сжатые полосы бетона. Анализ собранных данных по образованию и развитию трещин в коротких балках позволил сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на усилие образования трещин, являются пролет среза  $a/h_0$  и размеры грузовых либо опорных площадок  $l_{sup}$ . Характер изменения величины усилия образования трещин в зависимости от вышеуказанных факторов  $l_{sup}$  и  $a/h_0$  показан на рис. 1.

Анализ экспериментальных исследований позволил установить весьма важный для построения расчетной зависимости факт: закономерность изменения разрушающей силы от величины пролета среза, а также закономерность изменения разрушающей силы от размеров опорных и грузовых площадок оказались примерно одинаковыми с



закономерностью изменения усилий образования наклонных трещин при изменении вышеуказанных факторов (рис.2). Это указывает на целесообразность использования расчетной зависимости разрушающих расчетных усилий, основанных на каркасно-стержневой модели КСМ [3, 4], для определения усилий образования наклонных трещин в сжатой бетонной полосе.

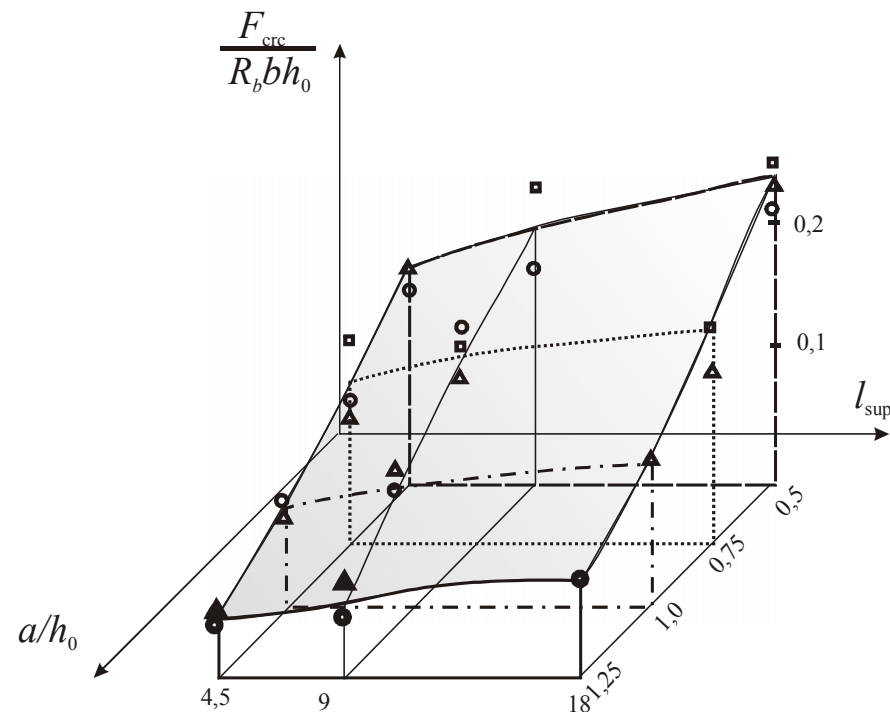


Рис. 1. Влияние размеров опорных площадок  $l_{sup}$  и пролета среза  $a/h_0$  на усилие образования трещин

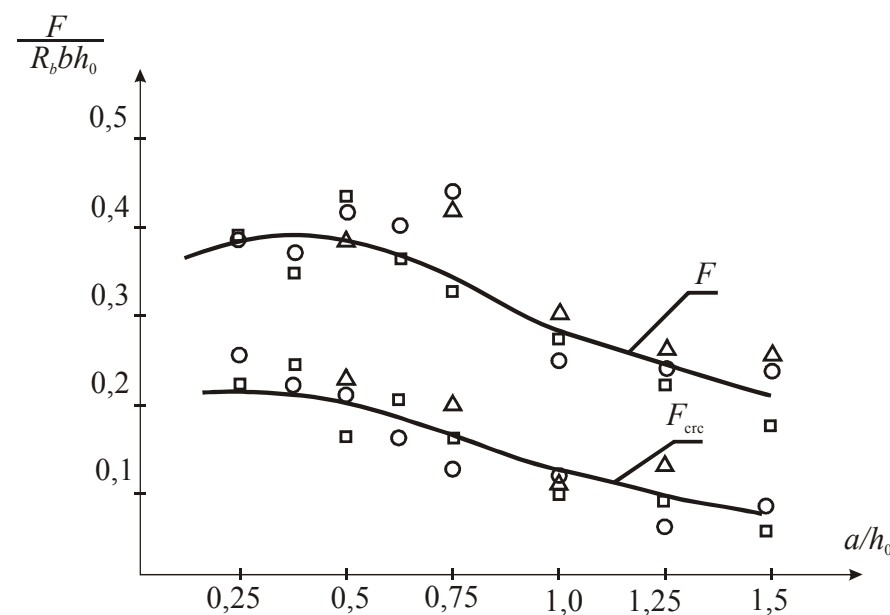


Рис. 2. График изменения разрушающей силы  $F$  и усилия образования наклонных трещин  $F_{crk}$  от величины пролета среза  $a/h_0$

Таким образом, при построении эмпирической зависимости для определения усилия образования трещин предлагается ввести некоторую поправку, отражающую влияние вышеуказанных факторов (численный коэффициент  $\gamma_{test}$ , учитывающий снижение усилия образования трещин и уточняющий закономерность изменения усилия образования трещин при изменении  $l_{sup}$  и  $a/h_0$  по сравнению с разрушающей

силой). Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно указаны в [6, 7, 8].

Зависимость усилия образования трещин  $F_{crk}$  от размеров опорных и грузовых площадок  $l_{sup}$ , от величины пролета среза  $a/h_0$ , т.е. совместного влияния основных факторов на разрушающую силу, позволяет определить три характерных коэффициента  $\gamma_{test}$  для учета указанных факторов. При изменении пролета среза  $a/h_0$  от 0,25 до 1,5 экспериментально определено следующее значение коэффициента  $\gamma_{test}$ : 0,7 для балок с грузовой и опорными площадками  $l_{sup}=4,5$  см; 0,6 для балок с  $l_{sup}=9$  см и 0,4 для балок с  $l_{sup}=18$  см (рис. 3). Эти коэффициенты максимально приближают усилие образования трещин к величине разрушающей силы. Для упрощения расчетной формулы целесообразно из трех перечисленных коэффициентов с допустимой погрешностью расчетной формулы принять  $\gamma_{test}=0,6$ .

В качестве второго фактора в вышеуказанной поправке для уточнения зависимости изменения разрушающей силы при изменении пролета среза  $a/h_0$  в расчетную формулу вводится функция  $\sin \alpha$  ( $\alpha$  – угол наклона сжатой бетонной полосы в соответствии с КСМ).

Таким образом, коэффициент  $\gamma_{crk}$ , учитывающий вышеуказанные факторы (см. рис. 3), определяется в виде

$$\gamma_{crk} = \gamma_{test} \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\gamma_{test}$  – численный коэффициент, учитывающий снижение усилия образования трещин по сравнению с разрушающей силой.

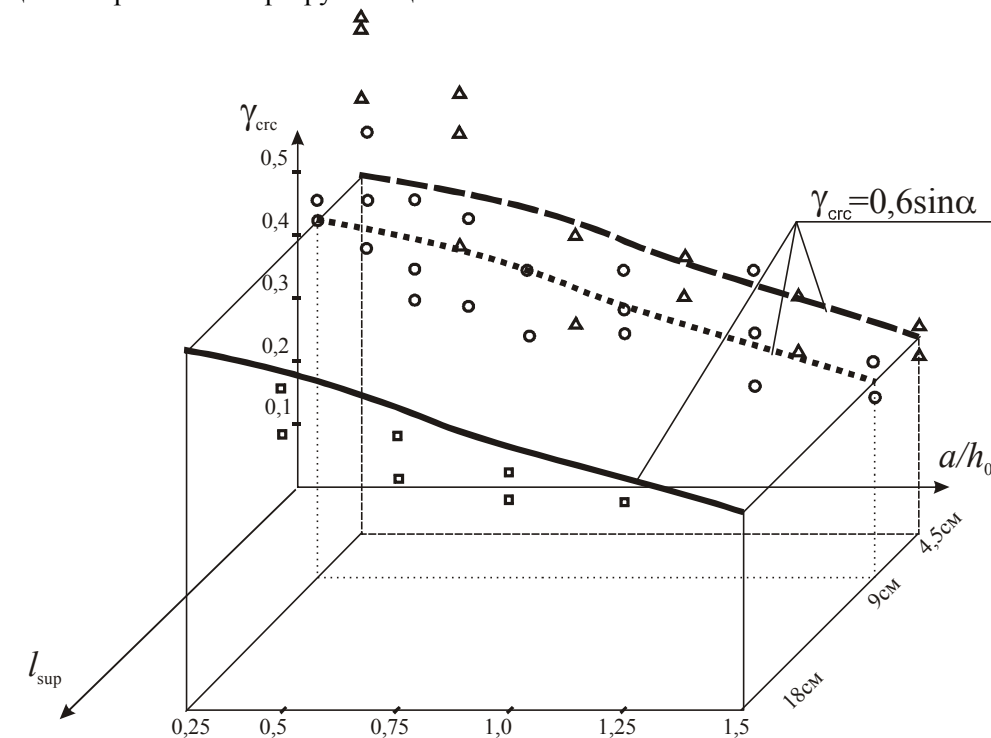


Рис. 3. График влияния размеров опорных площадок  $l_{sup}$  с одновременным влиянием пролета среза  $a/h_0$  на величину коэффициента  $\gamma_{crk}$

Усилие образования наклонных трещин предлагается определять в виде:

$$F_{crk} = \gamma_{crk} F, \quad (2)$$

где  $F$  – разрушающее усилие по сжатой зоне, определяемое согласно зависимости КСМ.

Для оценки расчетной зависимости (2) проводились исследования влияния на усилия образования трещин факторов, которые определяются авторами как второстепенные. В их числе: процент продольного армирования  $\mu_s$ , класс бетона В. На рис.2 показаны расчетные значения усилий образования наклонных трещин и результаты экспериментальных исследований.

Рассмотрим построение расчетной зависимости для определения усилий образования трещин в растянутой зоне. Аналогичный анализ сопоставления разрушающих усилий и усилий образования нормальных трещин позволил выявить, что закономерность изменения усилий трещинообразования аналогична закономерности изменения разрушающих усилий (в балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 0,25 до 1,5) (рис. 4). Следовательно, так же, как и в предыдущем случае, для построения расчетной зависимости целесообразно использовать условие прочности растянутой зоны, которое базируется по расчетной модели КСМ.

Таким образом, основной задачей при построении расчетной зависимости является определение коэффициента, учитывающего степень снижения усилия трещинообразования. На основе экспериментальных данных (в зависимости от ряда основных факторов:  $\mu_s$ ,  $R_s$ ,  $a/h_0$ ) установлен численный коэффициент  $\gamma_{s,crc}=0,5$ .

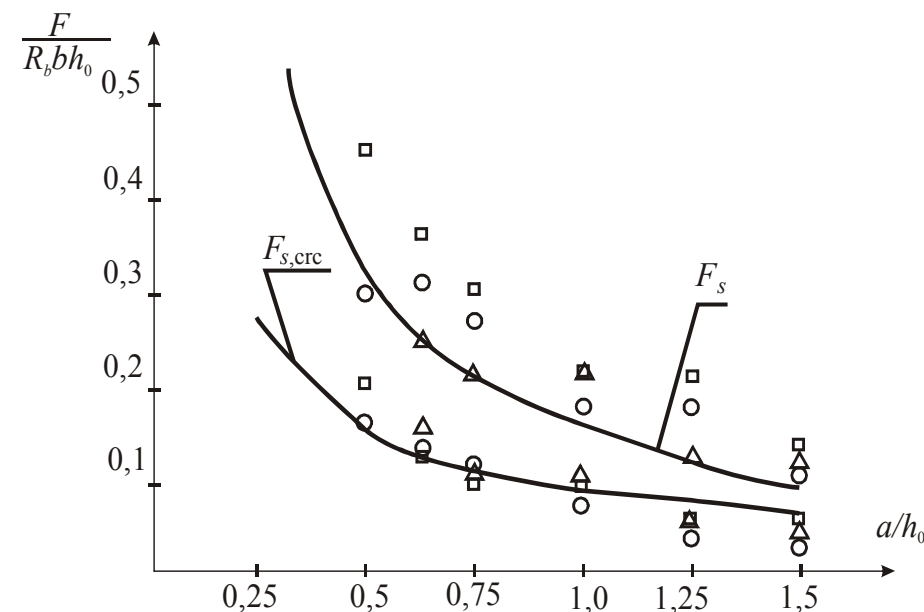


Рис. 4. График изменения разрушающей силы  $F_s$  и усилия образования нормальных трещин  $F_{s,crc}$  в зависимости от величины пролета среза  $a/h_0$

Определение внешней силы, при которой образуются нормальные трещины, предлагается производить по зависимости

$$F_{s,crc} = \gamma_{s,crc} F_s, \quad (3)$$

где  $F_s$  – разрушающее усилие, определяемое согласно зависимости КСМ;  $\gamma_{s,crc}$  – численный коэффициент.

#### Выводы

- В железобетонных балках с пролетом среза  $a/h_0$  от 0,25 до 1,5 выявлено два вида разрушения – разрушение по наклонной сжатой бетонной полосе и по растянутому арматурному поясу.
- При пролетах среза  $a/h_0$  от 0,25 до 1,5 выявлено три вида характерных трещин: наклонные трещины, выделяющие сжатую полосу бетона, вертикальные трещины в бетоне растянутой зоны и серия наклонных прерывистых трещин, характерных при раздавливании бетона.
- Расчет трещиностойкости коротких железобетонных балок предлагается производить по наклонной граничной трещине, выделяющей наклонные сжатые полосы бетона, и по нормальной трещине в растянутой зоне.
- Величины усилий образования граничных наклонных и вертикальных трещин хорошо согласуются с результатами экспериментальных данных при изменении  $a/h_0$  от 0,25 до 1,5.
- Метод расчета трещиностойкости коротких железобетонных балок рекомендуется использовать при проектировании зданий и сооружений, что обеспечит эконо-

мию материалов бетона и арматуры за счет рационального использования материалов, а также за счет повышения расчетных величин трещиностойкости.

#### Список литературы

1. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
2. Снежкина, О.В. Оценка каркасно-стержневых моделей для определения трещиностойкости балок / О.В. Снежкина, Ю.П. Скачков, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 101–104.
3. Баранова, Т.И. Моделирование работы коротких железобетонных балок / Т.И. Баранова, Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, Р.А. Ладин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 2 (36). – С. 54–60.
4. Снежкина, О.В. Расчет прочности железобетонных балок со средним пролетом среза / О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1. – С. 118–122.
5. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы: монография / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 124 с.
6. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1(10). – С.4–9.
7. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1(12). – С.39–43.
8. Будылина, Е.А. Основные принципы проектирования сложных технических систем в приложениях / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.С. Махонин // Молодой ученый. – 2013. – №5. – С.42–45.

#### References

1. Skachkov, Y.P. Definition of schemes and destruction cracking of short concrete beams experimental data / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Korniyuhin // Regional architecture and construction. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
2. Snezhkina, O.V. Estimation of frame-and-rod models for the determination of fracture toughness of beams / O.V. Snezhkin, Y.P. Skachkov, R.A. Ladin // Regional architecture and construction. – 2015. – No. 1. – P. 101–104.
3. Baranova, T.I. Modeling work of short reinforced concrete beams / T.I. Baranova, Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Journal of Siberian Russian state automobile and road Academy. – 2014. – No. 2 (36). – P. 54–60.
4. Snezhkina, O.V. Calculation of the strength of reinforced concrete beams with an average span of the slice / O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Korniyuhin, R.A. Ladin // Regional architecture and construction. – 2014. – No. 1. – С. 118–122.
5. Snezhkina, O.V. Short beams. Modelling of physical work: monography / O.V. Snezhkina, A.V. Korniyuhin, M.V. Kochetkova. – Penza: PGUAS, 2011. – 124 p.
6. Skachkov, Y.P. Modification of the method of PATTERN to the solution of the architecture-and-construction issues / Y.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and construction. – 2011. – №1(10). – P.4–9.
7. Garkina, I.A. Management in complex technical systems: methodological principles of management / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. – 2012. – №1(12). – P.39–43.
8. Budilina, E.A. Main principles of designing of complex technical systems in the applications / E.A. Budilina, I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.S. Makhonin // Young scientist. – 2013. – №5. – P.42–45.

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

**Нежданов Кирилл Константинович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Антонов Сергей Анатольевич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: muka-servis58@mail.ru

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

**Nezhdanov Kirill Konstantinovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building construction»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Antonov Sergey Anatolyevich**,  
Postgraduate of the department «Building  
construction»  
E-mail: muka-servis58@mail.ru

## МОНОЛИТНЫЙ ФУНДАМЕНТ С ТОЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ АНКЕРНЫХ СТЕРЖНЕЙ

К.К. Нежданов, С.А. Антонов

Предложена конструкция монолитного железобетонного фундамента с точным расположением анкерных арматурных стержней, которая обеспечивает жёсткое равнопрочное соединение колонн с фундаментами при помощи продольно-разъёмных муфт, восстановление и рихтовку положения колонны по высоте при опасных осадках фундамента.

*Ключевые слова:* монолитный фундамент, анкерный стержень, винтовая арматура, точное расположение, рихтовка положения

## SOLID FOUNDATION WITH EXACT LOCATION OF ANCHOR RODS

К.К. Nezhdanov, S.A. Antonov

The authors offer the design of solid reinforced concrete foundation with exact location of anchor rods, which provides full-strength rigid connection of columns with foundations using longitudinal detachable sleeves, restoration and alignment of the column height position at dangerous foundation settlement.

*Keywords:* solid foundation, truss rod, screw fittings, exact location, straightening position

В железобетонных конструкциях сопряжение колонн с фундаментами выполняется так называемым «стаканным» способом, суть которого заключается в том, что в теле фундамента при его возведении оставляется клиновидно сужающееся к низу гнездо, квадратное или прямоугольное в плане. Размеры гнезда превышают внешние габариты сечения колонны на 150...250 мм.

Строительным краном колонну опускают в этот «стакан» до опирания в дно гнезда и расклинивают в нём с помощью деревянных клиньев с четырёх сторон. После раскрепления колонны в фундаменте её бетонируют вместе с клиньями, что исключает дальнейшую рихтовку положения колонны, как по вертикали, так и по горизонтали. При расчёте узел сопряжения колонн с фундаментом считают жёстким, однако достаточную жёсткость такая конструкция не обеспечивает. При возведении фундаментов в зимнее время опасно попадание воды в «стакан», так как при замерзании вода расширяется на 9 % и разрывает фундамент.

Проблема состоит в том, что при монтаже колонн возникают отклонения от проектного положения как по горизонтали, так и по вертикали, что неблагоприятно сказывается на точности возведения конструкций (ригелей, колонн) и, как следствие, всего каркаса здания или сооружения. Также необходимо соблюдать требования по предельным отклонениям расположения анкерных болтов в плане: внутри контура опоры – 5 мм, вне контура опоры – 10 мм, что не всегда выполняется (СП

Для решения поставленной проблемы разработана конструкция монолитного железобетонного фундамента (рис. 1) с точным расположением анкерных арматурных стержней.

Изготовление новой конструкции происходит следующим образом. Выполняют геодезическую разбивку осей сооружения. На пересечении осей сооружения выкапывают котлованы проектной глубины для фундаментов под колонны. Для минимизации прогнозируемых неравномерных осадок уплотняют грунтовое основание вибротрамбовками. Выполняют уплотнённую песчаную или щебеночную подготовку толщиной 300...400 мм. После этого монтируют арматурную сетку фундамента и бетонируют нижнюю часть фундамента до отметки низа анкерных арматурных стержней.

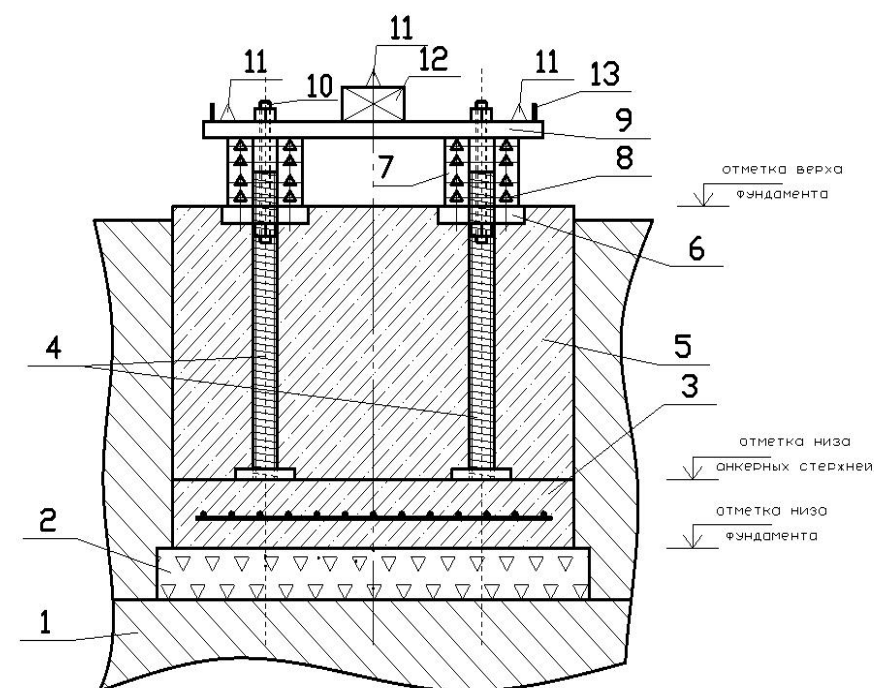


Рис. 1. Монолитный фундамент с точным расположением анкерных стержней в момент, когда ещё не демонтирован шаблон-вибратор:

- 1 – уплотнённое грунтовое основание; 2 – уплотнённое песчаное или щебеночное основание толщиной 300...400 мм; 3 – нижняя часть фундамента; 4 – анкерные арматурные стержни; 5 – верхняя часть фундамента; 6 – стальные фланцы с отверстиями; 7 – продольно-разъёмные муфты с рифами; копирующими рифы анкерных стержней; 8 – соединительные шпильки с гайками для стягивания половинок продольно-разъёмных муфт; 9 – плита шаблона-вибратора; 10 – высокоресурсные шпильки с шайбами и гайками; 11 – мушки для точной ориентации шаблона-вибратора в соответствии с осями фундамента здания; 12 – электровибратор; 13 – монтажные петли для монтажа шаблона-вибратора строительным краном

После схватывания бетона нижней части фундамента строительным краном монтируют шаблон-вибратор, представляющий следующую конструкцию: анкерные арматурные стержни (4...8 шт.) с внешними гребнями и впадинами, образующими винтовую спираль [2, с. 73] (хотя рельеф внешней поверхности может быть любой), к анкерным арматурным стержням присоединены фланцы с отверстиями, продольно-разъёмные муфты [3, с. 77, рис. 1] с внутренними гребнями и впадинами, которые копируют гребни и впадины анкерных арматурных стержней, соединительные шпильки (марка стали 40Х «Селект») с гайками и шайбами стягивают половины продольно-разъёмных муфт друг с другом и жёстко соединяют их в единое целое с анкерными

стержнями, плита соединяется с фланцами при помощи вертикальных шпилек с гайками, на плите сверху закреплены мушки для точной установки шаблона-вибратора и неподвижно закреплён электровибратор. В сборке вся конструкция образует шаблон-вибратор. Такая конструкция его необходима для того, чтобы анкерные стержни установить точно в проектное положение. На плите имеются монтажные петли для монтажа шаблона-вибратора строительным краном.

Строительный кран поднимает шаблон-вибратор вместе с закреплёнными на нём анкерными арматурными стержнями и транспортируют его к фундаменту, нижняя часть которого забетонирована до отметки низа заложения анкерных стержней. При монтаже используют не менее двух лазерных нивелиров, подающих взаимоперпендикулярные лучи, проходящие над мушками. Лучи пересекаются над центром плиты. При опускании шаблона-вибратора монтажник поворачивает его вокруг вертикальной оси и добивается совмещения заострённых мушек с лазерными лучами. В момент совпадения шаблон-вибратор опускают до упора в нижнюю часть фундамента.

Бетонируют верхнюю часть фундамента, расположенную выше отметки низа анкерных стержней. До схватывания бетона верхней части фундамента проектную отметку контролируют нивелиром. Виброплощадкой уплотняют бетон и осаживают его до проектной отметки заложения анкерных стержней. В необходимых случаях производят корректировку отметки, добавляя бетон или осаживая его вибратором. Включают вибратор и уплотняют пластичный бетон верхней части фундамента. После схватывания бетона отсоединяют плиту от фланцев и демонтируют шаблон-вибратор, снимая его с анкерных арматурных стержней, установленных точно в проектное положение (рис. 2).

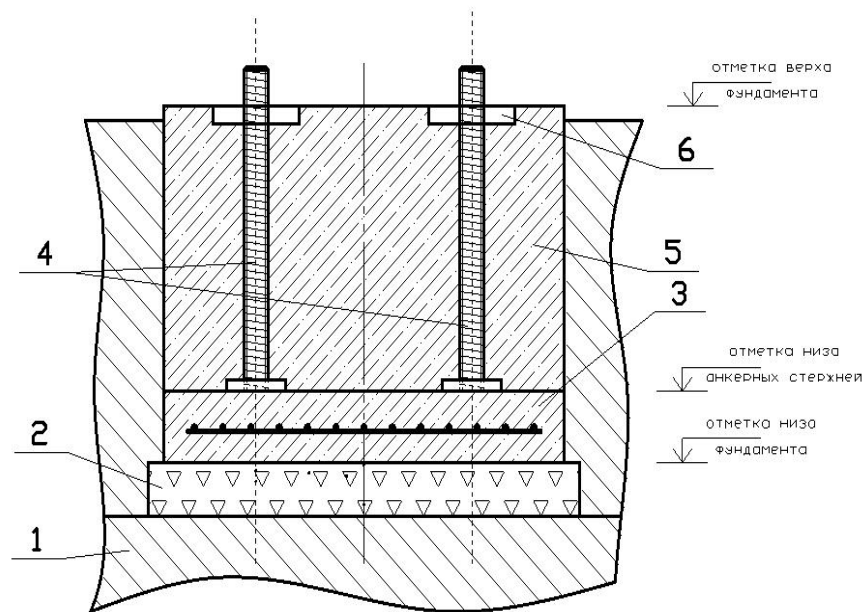


Рис. 2. Монолитный фундамент с точным расположением анкерных стержней в момент, когда демонтирован шаблон-вибратор:

- 1 – уплотнённое грунтовое основание; 2 – уплотнённое песчаное или щебеночное основание толщиной 300...400 мм; 3 – нижняя часть фундамента; 4 – анкерные арматурные стержни; 5 – верхняя часть фундамента; 6 – стальные фланцы с отверстиями

После демонтажа шаблона-вибратора нивелиром осуществляют контроль правильности установки анкерных стержней. Гайковёртом ослабляют крепёжные гайки на шпильках, стягивающих половинки продольно-разъёмных муфт, и демонтируют фланцы. Затем вновь надевают продольно-разъёмные муфты на анкерные арматурные стержни, на половину их высоты, не затягивая гайки на шпильках, образуя при этом выпуски для дальнейшего армирования конструкции железобетонного каркаса.

Благодаря точному расположению анкерных стержней в фундаменте возможно осуществить безвыверочный монтаж колонны. Для этого выпуски арматурных стержней колонны опускают в продольно-разъёмные муфты до упора с анкерными стержнями. Гайковёртом затягивают шпильки продольно-разъёмных муфт, благодаря чему жёстко соединяется колонна с фундаментом.

При опасных осадках фундамента полученная конструкция позволяет производить рихтовку положения колонны в следующем порядке:

1. Ослабляют натяжение шпилек продольно-разъёмных муфт путём откручивания гаек гайковёртом.
2. Используя пару гидродомкратов и домкратную балку, пропущенную через технологическое отверстие, приподнимают колонну на величину осадки и фиксируют её в проектное положение.
3. Гайковёртом затягивают гайки на шпильках продольно-разъёмных муфт, тем самым обратно жёстко соединяют анкерные стержни фундамента со стержнями колонны.

По результатам произведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана новая конструкция монолитного фундамента с точным расположением анкерных стержней, обеспечивающая точность монтажа каркасов сооружений как по вертикали, так и по горизонтали.
2. Обеспечивается жёсткое соединение железобетонного фундамента с колонной при помощи продольно-разъёмных муфт.
3. Возникает снижение трудоёмкости монтажа узла за счёт того, что анкерные стержни установлены точно в проектное положение.
4. Обеспечивается возможность восстановления проектного положения колонн по высоте при опасных осадках фундаментов за счёт использования продольно-разъёмных муфт.

Конструкцию монолитного железобетонного фундамента с точным расположением анкерных стержней рекомендуется применять при строительстве любых каркасов сооружений. Особенно актуальным является её применение при строительстве железобетонных монолитных или сборно-монолитных каркасов сооружений.

#### Список литературы

1. Нежданов, К.К. Конструкция спирального виадука / К.К. Нежданов, С.А. Антонов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3(17). – С. 86–90.
2. Нежданов, К.К. Новый вид винтовой горячекатаной арматуры для железобетонных конструкций / К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №3(20). – С. 71–74.
3. Нежданов, К.К. Жёсткая равнопрочная продольная стыковка двух арматурных стержней периодического профиля с любым рельефом поверхности / К.К. Нежданов, С.А. Антонов // Безопасность и эффективность строительных конструкций: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 76–81.

#### References

1. Nezhdanov, K.K. The design of the spiral viaduct / K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3 (17). – P. 86–90.
2. Nezhdanov, K.K. A new kind of hot screw fittings for concrete structures / K.K. Nezhdanov, D.V. Artiushin // Regional architecture and engineering. – 2014. – №3 (20). – P. 71–74.
3. Nezhdanov, K.K. Rigid docking of two equal strength longitudinal reinforcing bars periodic profile with any surface relief / K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov // The safety and efficacy of building structures: Sat. Art. Intern. scientific and engineering. Conf. – Penza: PGUAS, 2013. – P. 76–81.



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

**Нежданов Кирилл Константинович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Антонов Сергей Анатольевич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: muka-servis58@mail.ru

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

**Nezhdanov Kirill Konstantinovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building construction»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru  
**Antonov Sergey Anatolyevich**,  
Postgraduate of the department «Building  
construction»  
E-mail: muka-servis58@mail.ru

## НОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ СТАЛЕТРУБОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ ФУНДАМЕНТОМ

К.К. Нежданов, С.А. Антонов

Предложено жёсткое соединение сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом, позволяющее снизить материалоемкость конструкции узла и трудоёмкость его монтажа и обеспечивающее возможность рихтовки положения колонн по высоте при опасных осадках фундаментов.

*Ключевые слова:* сталетрубобетонная колонна, железобетонный фундамент, винтовая арматура, жёсткое соединение, рихтовка положения

### NEW CONNECTION STEELTUBECONCRETE COLUMN WITH REINFORCED BASES

K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov

The authors have suggested a rigid assembly of steeltubeconcrete columns with concrete bases, which allows to reduce consumption of materials and complexity of its installation and enables to straighten the position of the columns height at dangerous foundation settlement.

*Keywords:* steeltubeconcrete column, reinforced concrete foundation, screw fittings, rigid assembly, straightening position

В настоящее время соединение стальных колонн с железобетонными фундаментами выполняется при помощи анкерных пластин и анкерных болтов с шайбами. Анкерные пластины привариваются к конструкции базы стальной колонны вручную с использованием электродуговой сварки. При выполнении сварки в зимнее время и плохих погодных условиях качество сварных соединений резко снижается, а производительность труда падает. Узел соединения получается не технологичным, конструкция базы громоздка и материалоемка из-за наличия траверс и опорных рёбер. Стало невозможно производить рихтовку колонн по высоте при опасных осадках фундамента. Возникла необходимость повышения технологичности узлов строительных конструкций.

Для решения поставленной проблемы предложено жёсткое соединение самонапрягающейся сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом (рис. 1). Особенность конструкции нового соединения заключается в присоединении анкерных арматурных стержней, выходящих из железобетонного фундамента, к телу сталетрубобетонной колонны продольно-разъёмными муфтами.

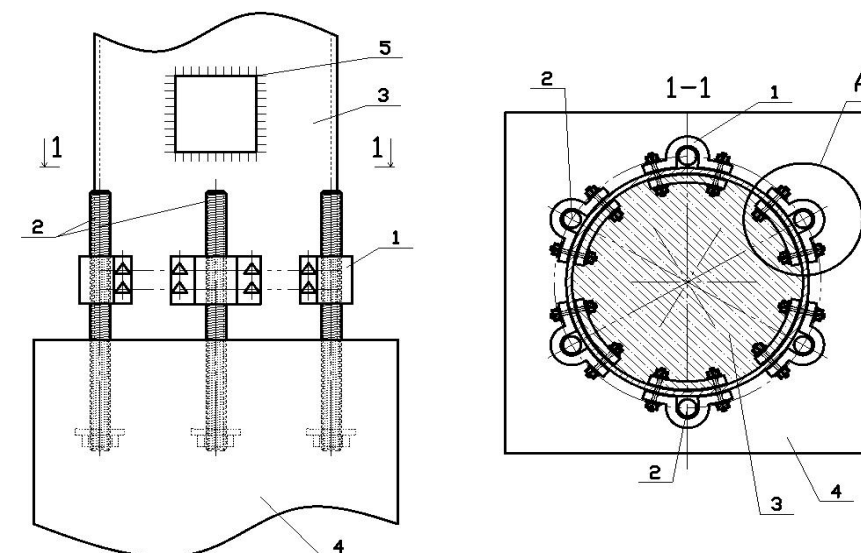


Рис. 1. Жёсткое соединение сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом:  
1 – продольно-разъёмные муфты в сборке; 2 – анкерные арматурные стержни;  
3 – сталетрубобетонная колонна; 4 – железобетонный фундамент; 5 – технологическое отверстие

Для этого на заводах металлоконструкций изготавливают продольно-разъёмные муфты. Муфта состоит из двух половинок, площадь поперечного сечения которых на 8...10 % больше площади поперечного сечения присоединяемого анкерного арматурного стержня. Процесс их изготовления происходит в следующей технологической последовательности. Каждую заготовку для половинок продольно-разъёмной муфты отливают непрерывным литьём из расплава легированной стали. Марка стали двух половинок аналогична марке стали анкерных арматурных стержней. Причём в одной из половинок заготовки предусмотрен продольный цилиндрический жёлоб, диаметр которого соответствует минимальному диаметру присоединяемых анкерных арматурных стержней. После охлаждения заготовки 1 (рис. 2) до температуры пластического состояния 950...1050°C горячего проката их подают на прокатный стан, где несколькими валками обкатывают продольный жёлоб и выдавливают в нём рифы гребней и впадин, которые копируют соответственно рифы гребней и впадин анкерных стержней. Во время проката прошивают отверстия вдоль продольных кромок каждой половинки заготовки для продольно-разъёмного соединения. Готовую длинную половинку заготовки разрезают на элементы стандартной длины, после чего происходит процесс сборки продольно-разъёмной муфты. Совмещают соосные отверстия в каждой паре половинок муфты, соединяют половинки муфт высокоресурсными шпильками с шайбами и гайками (марка стали 40X «Селект»). В результате образуется сборная продольно-разъёмная муфта (см. рис. 2).

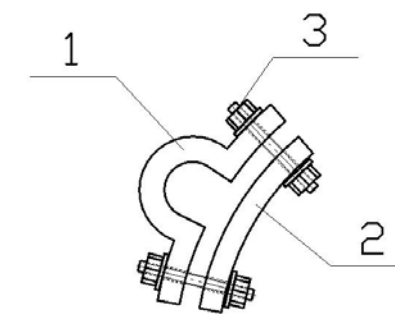


Рис. 2. Продольно-разъёмная муфта в сборке:  
1 – половинка продольно-разъёмной муфты с продольным жёлобом;  
2 – половинка продольно-разъёмной муфты без продольного жёлоба;  
3 – высокоресурсные шпильки с шайбами и гайками



Главное функциональное назначение продольно-разъёмной муфты – жёсткое равнопрочное присоединение анкерных арматурных стержней, выходящих из железобетонного фундамента, к сталетрубобетонной колонне. В качестве анкерных арматурных стержней используется арматура с поперечной накаткой рифов по винтовой спирали [2, с. 73]. Причём анкерные стержни могут иметь любой рельеф поверхности, например, рельеф поверхности с хаотичным расположением рифов гребней и впадин, какой имеют прокатываемые в настоящее время арматурные стержни [3, с. 76].

Для соединения с продольно-разъёмной муфтой в теле стальной колонны прошивают отверстия с таким же шагом, как в муфте, а привязываются они согласно расположению анкерных арматурных стержней в железобетонном фундаменте. Торцы стальной колонны фрезеруют. Перед монтажом колонну снабжают продольно-разъёмными муфтами. Также в теле колонны устраивается технологическое отверстие для пропуска домкратной балки.

Далее происходит процесс монтажа на строительной площадке. Он начинается с установки стальной колонны в проектное положение на железобетонный фундамент, в котором уже расположены анкерные арматурные стержни. Для удобства монтажа и быстрой установки в проектное положение используются зубья-фиксаторы, имеющиеся на колонне. Установив колонну, стягиваются шпильки продольно-разъёмных муфт гайками при помощи гайковёрта. Полость в колонне заполняется самоуплотняющимся бетоном. Бетон в полости стальной колонны расширяется, но снаружи стальная стенка колонны препятствует его расширению. Происходит самоуплотнение и образуется сталетрубобетонная колонна. В результате получается жёсткое соединение сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом путём присоединения анкерных арматурных стержней к колонне продольно-разъёмными муфтами (рис. 3).

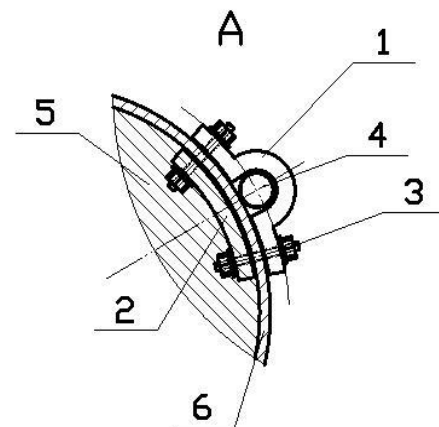


Рис. 3. Рихтуемый узел жёсткого соединения сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом в сборке:

- 1 – половинки продольно-разъёмных муфт с продольным жёлобом;  
2 – половинки продольно-разъёмных муфт без продольного жёлоба; 3 – высокоресурсные шпильки с шайбами и гайками; 4 – анкерные арматурные стержни; 5 – самоуплотняющийся бетон; 6 – колонна из стальной трубы

В новом фрикционном соединении вертикальные опорные реакции от колонн передаются на железобетонный фундамент через анкерные арматурные стержни за счёт жёсткого присоединения их к колонне продольно-разъёмными муфтами. Следует заметить, что анкерные стержни в такой конструкции воспринимают как растягивающие, так и сжимающие усилия от внецентренно приложенной нагрузки.

При опасных осадках фундамента рихтуемый узел соединения сталетрубобетонной колонны с фундаментом позволяет восстанавливать проектное положение колонны в следующем порядке:

1) ослабляют натяжение шпилек продольно-разъёмных муфт путём откручивания гаек гайковёртом;

2) используя пару гидродомкратов и домкратную балку, пропущенную через технологическое отверстие, приподнимают колонну на величину осадки и фиксируют её в проектное положение;

3) гайковёртом затягивают гайки на шпильках продольно-разъёмных муфт, тем самым обратно жёстко присоединяют анкерные арматурные стержни к сталетрубобетонной колонне.

По результатам произведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработано новое рихтуемое жёсткое соединение сталетрубобетонной колонны с железобетонным фундаментом при помощи продольно-разъёмных муфт.
2. Обеспечивается возможность восстановления проектного положения колонны по высоте при опасных осадках фундамента за счёт использования продольно-разъёмных муфт.
3. Происходит снижение материалоемкости конструкции узла в 5...6 раз за счёт отсутствия громоздкой базы с траверсами и опорными рёбрами.
4. Обеспечено снижение трудоёмкости монтажа узла за счёт отказа от использования малопроизводительной ручной сварки.
5. Рекомендуются применять такую конструкцию узла при проектировании и строительстве зданий и сооружений на просадочных грунтах.
6. Дальнейшей задачей является проведение экспериментального исследования на подготовленной к испытанию модели конструкции узла.

#### Список литературы

1. Нежданов, К.К. Конструкция спирального виадука / К.К. Нежданов, С.А. Антонов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3(17). – С. 86–90.
2. Нежданов, К.К. Новый вид винтовой горячекатаной арматуры для железобетонных конструкций / К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №3(20). – С. 71–74.
3. Нежданов, К.К. Жёсткая равнопрочная продольная стыковка двух арматурных стержней периодического профиля с любым рельефом поверхности / К.К. Нежданов, С.А. Антонов // Безопасность и эффективность строительных конструкций: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 76–81.

#### References

3. Nezhdanov, K.K. The design of the spiral viaduct / K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3 (17). – P. 86–90.
4. Nezhdanov, K.K. A new kind of hot screw fittings for concrete structures / K.K. Nezhdanov, D.V. Artiushin // Regional architecture and engineering. – 2014. – №3 (20). – P. 71–74.
3. Nezhdanov, K.K. Rigid docking of two equal strength longitudinal reinforcing bars periodic profile with any surface relief / K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov // The safety and efficacy of building structures: Sat. Art. Intern. scientific and engineering. Conf. – Penza: PGUAS, 2013. – P. 76–81.

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

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

**Ишмаева Дарья Дмитриевна**,  
инженер-исследователь научно-  
исследовательского сектора  
E-mail: ishmaeva.dd@gmail.com

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Vdovin Vyacheslav Mikhailovich**,  
Candidate of Science, Professor of the  
department «Building construction»

**Ishmaeva Darya Dmitrievna**,  
Engineer Research sector  
E-mail: ishmaeva.dd@gmail.com

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕСТКОГО УЗЛА БАЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева

Представлены результаты численных исследований напряженного состояния элементов жесткого узла балочной структуры. Дается оценка этих результатов при разных схемах загрузки и сравнение с данными физического эксперимента.

*Ключевые слова:* балочная структура, клеёная деревянная балка, жесткий узел, стальная шайба

### STRESS STATE OF RIGID UNIT ELEMENTS OF BEAN STRUCTURE

V.M. Vdovin, D.D. Ishmaeva

The results of numerical studies of stress state of rigid unit elements of bean structure are presented. Estimation of these results at different schemes of loading and comparison with experimental data are given.

*Keywords:* beam structure, glued wooden beam, rigid unit, steel washers

Жесткие узлы в клеёных деревянных конструкциях всегда вызывают особый интерес ввиду определенной сложности изготовления и особой их роли при обеспечении надежной работы в процессе восприятия действующих в узле усилий. В наибольшей степени это проявляется при проектировании балочных структур, где достаточно мощные деревянные балочные элементы, пересекаясь между собой, образуют жесткие узлы, которые должны обеспечить пространственную работу балочного покрытия. Наличие жестких узлов в таких покрытиях неоспоримо важно и необходимо.

Авторами разработана конструкция жесткого узла сопряжения клееных балочных элементов в структурах с применением клеенных металлических шайб. Описание узла и результаты экспериментальных исследований его представлены в работах [1] и [3]. Показано, что применение клеенных в древесину шайб в местах постановки соединительных болтов позволило значительно повысить несущую способность и увеличить жесткость узлового соединения, а также уменьшить в нем количество соединительных болтов и уменьшить длины металлических пластин. В работах отмечается и ряд преимуществ этого соединения.

Однако для решения вопроса о реальной надежности работы узла потребовались более детальные экспериментальные и теоретические исследования. Натурные испытания [1] жесткого узла сопряжения клееных балочных элементов перекрестно-балочной структуры при разных схемах нагружения показали принципиальную возможность использования клеенных металлических шайб для создания жестких узлов структур. Вместе с тем для более полной оценки работы жесткого узлового сопряжения элементов и решения вопроса о конструктивной надежности его желательно знать действительное напряженно-деформированное состояние всех

элементов, сходящихся в узле, с учетом действия различных по характеру нагрузок. С этой целью ниже приводятся результаты теоретических расчетов по оценке напряженного состояния элементов жесткого узла структуры на клеенных металлических шайбах.

Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS, основанном на методе конечных элементов. Комплекс позволяет проводить имитационное моделирование работы исследуемой конструкции на основе подробного описания ее геометрии и свойств применяемых материалов. Предварительно с применением этой же программы были проделаны вычисления для исследования деформационной картины работы жесткого узла структурной балочной конструкции при разных схемах нагружения. Результаты расчета с описанием исходных данных приведены в работе [2]. Как отмечено в [2], расчеты показали вполне удовлетворительные результаты, согласующиеся с данными экспериментов.

Учитывая это, процедура нижеприведенного расчета принята аналогичной [2] и включала четыре основных этапа: построение модели, разбивка модели на сетку конечных элементов, приложение нагрузок и получение решения, просмотр и анализ результатов.

Для моделирования металлических шайб, пластин и болтов, а также деревянных элементов был использован конечный элемент Solid187. Элемент Solid187 является трёхмерным (3D) элементом задач МДТТ [105], имеет квадратичное представление перемещений и в состоянии использовать нерегулярную форму сетки.

Древесина соединяемых элементов представлена как ортотропный материал с тремя независимыми характеристиками  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ , тремя коэффициентами Пуассона  $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{yz}$ ,  $\mu_{xz}$  и тремя модулями сдвига  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ .

Основной целью на этапе разработки геометрической модели является создание адекватной конечно-элементной модели, состоящей из узлов и элементов. Разбивка на конечные элементы металлических и деревянных частей образца осуществлена отдельно с присвоением им соответствующих свойств. Общий вид разбивки модели узла на сетку конечных элементов представлен на рис. 1.

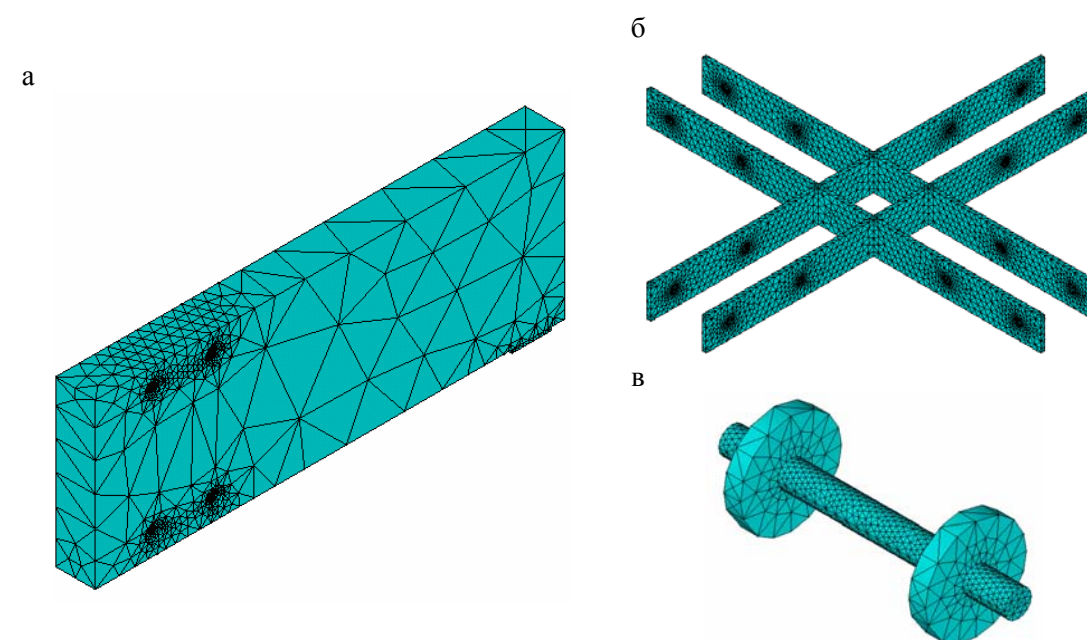


Рис. 1 – Разбивка моделей на сетку конечных элементов:

а – деревянный балочный элемент; б – соединительный элемент; в – шайбы с болтом

Исследование работы узла производилось на нагрузки, принятые в процессе проведения физического эксперимента, который достаточно подробно описан в работе [1].

Важным этапом решаемой задачи является задание условий взаимного контакта всех составных элементов узла. Ввиду монолитной вклейки металлических шайб в деревянные элементы целесообразно моделировать их целостность в работе узла наложением контактных напряжений в швах, воспринимающих растягивающие и сжимающие напряжения. Аналогично задано взаимодействие болтов с отверстиями металлических соединительных пластин. При этом прямого контакта болтов с древесиной не происходит, т.к. отверстия под болты в клеёных деревянных элементах делаются несколько большего диаметра болтов. Отсутствует также контакт между соединительными деталями и деревянными балочными элементами. Все взаимодействие происходит через связи между древесиной и шайбами, а также болтами и соединительными деталями.

Весь узел закреплен путем наложения связей в направлении осей *X*, *Y* и *Z*, где имеет место расстановка неподвижных опор при проведении физического эксперимента и подвижных опор по оси *Z*.

Результаты расчетов в программе ANSYS при данных, описанных выше, приведены в виде графиков распределения нормальных напряжений по сечениям и точкам, где были установлены тензорезисторы в процессе проведения физического эксперимента (рис. 2).

На рис. 3, 4 и 5 представлены графики распределения напряжений в деревянных элементах по наиболее характерным сечениям. Сравнение теоретических и экспериментальных значений напряжений при разных схемах нагружения жесткого узла приведено в таблице.

Сравнение теоретических и экспериментальных значений напряжений в жёстких узлах на клеенных стальных шайбах при различных схемах приложения нагрузки

| Номер схемы приложения нагрузки | Величина нагрузки, кН | Номер датчика | Значения напряжений, МПа    |                      |
|---------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------|----------------------|
|                                 |                       |               | полученные экспериментально | подсчитанные в ANSYS |
| 2                               | 105                   | T-10          | 0,82                        | 0,67                 |
|                                 |                       | T-11          | 7,59                        | 5,64                 |
|                                 |                       | T-12          | 2,74                        | 2,59                 |
|                                 |                       | T-13          | 6,93                        | 5,34                 |
|                                 |                       | T-15          | -7,75                       | -4,07                |
|                                 |                       | T-16          | -4,55                       | -4,55                |
| 3                               | 90                    | T-11          | 1,77                        | 0,67                 |
|                                 |                       | T-12          | 0,10                        | 0,09                 |
|                                 |                       | T-13          | 1,43                        | 0,58                 |
|                                 |                       | T-19          | -1,66                       | -1,57                |
| 4                               | 140                   | T-21          | 1,84                        | 1,24                 |
|                                 |                       | T-25          | -2,52                       | -3,39                |
|                                 |                       | T-27          | 4,50                        | 6,71                 |
|                                 |                       | T-28          | -2,11                       | -1,92                |
|                                 |                       | T-30          | 1,87                        | 2,02                 |

Как видно из сравнения, величины напряжений, полученные экспериментальным и теоретическим методом с использованием программы ANSYS, расходятся незначительно. Некоторые различия в величинах напряжений вполне объяснимы тем, что значения напряжений как теоретические, так и экспериментальные, подсчитаны по единому осредненному значению модуля упругости. В то время как истинные точечные значения модуля упругости в месте наклейки датчиков в клеёном деревянном элементе определить не представляется возможным, а от его величины зависит фактическое значение напряжений.

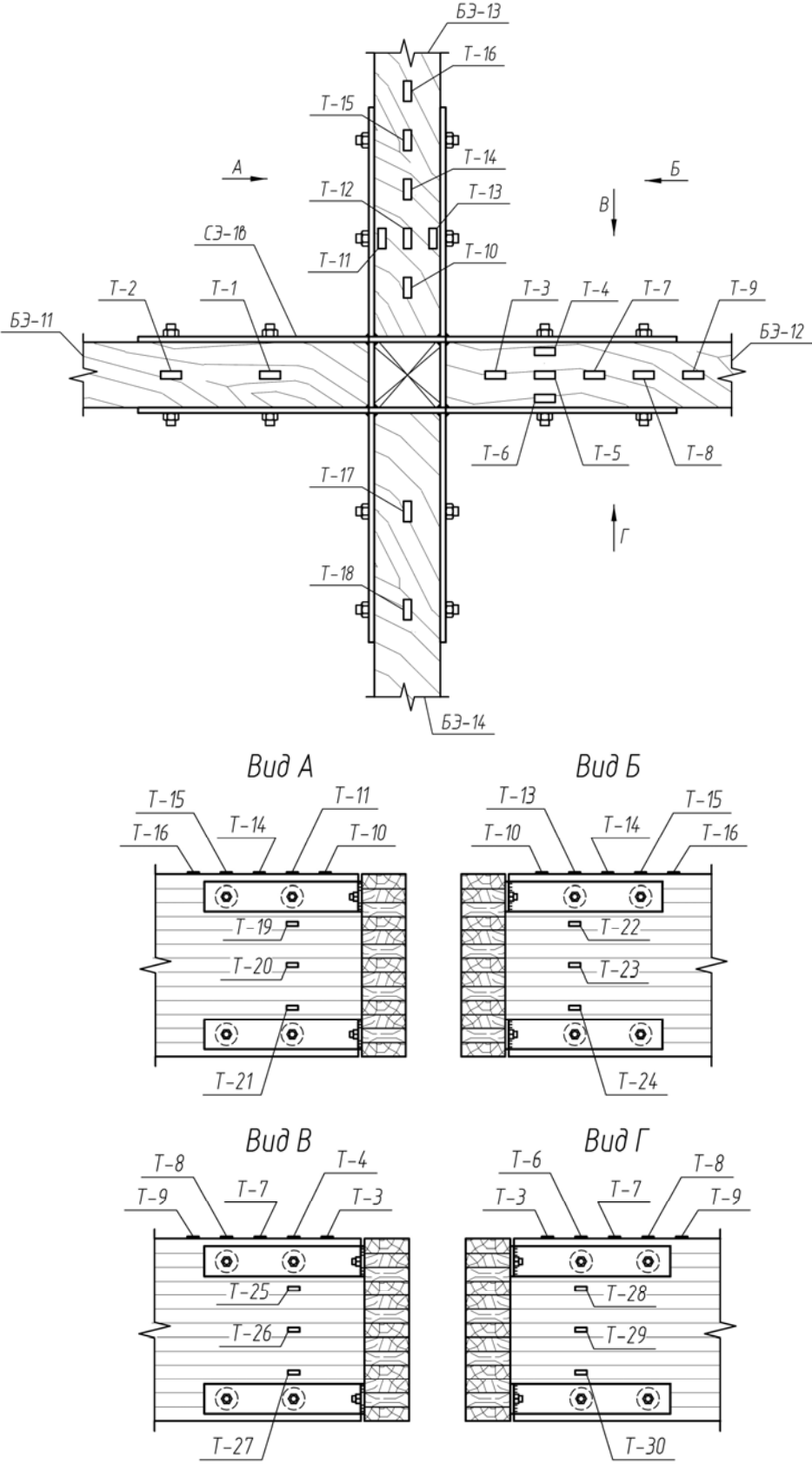


Рис. 2. Схема наклейки тензорезисторов при испытании жесткого узла

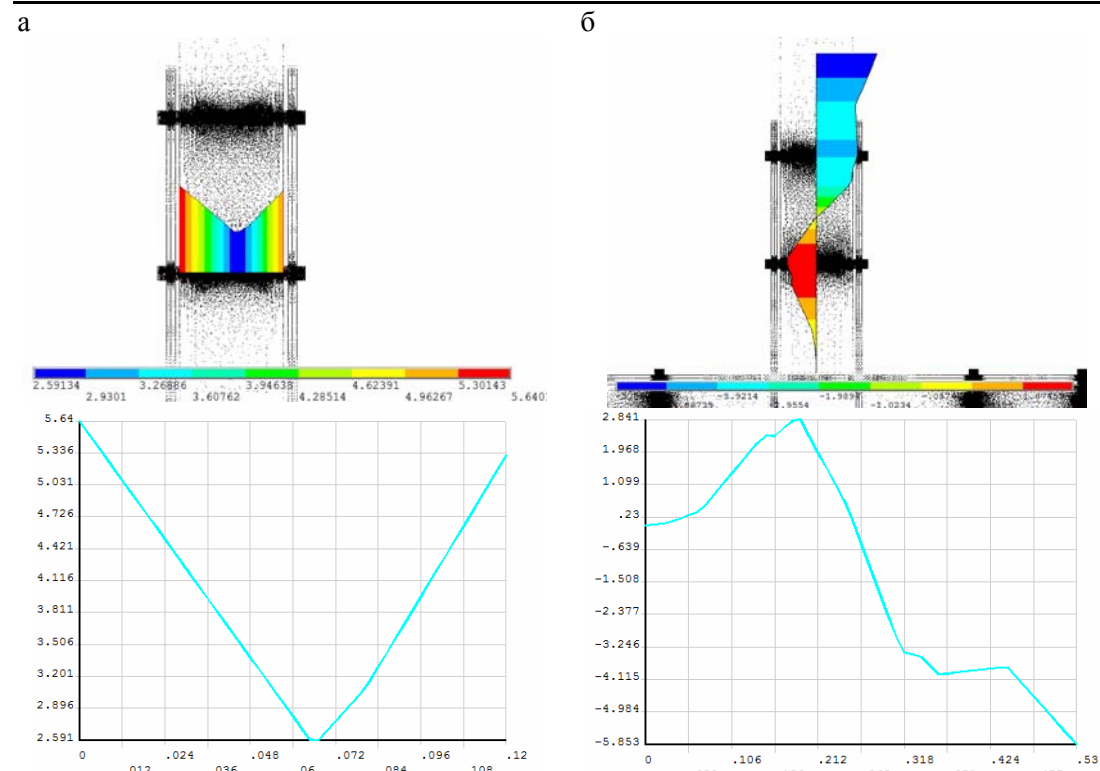


Рис.3. Эпюры и графики распределения нормальных напряжений (МПа) при действии нагрузки по схеме №2 в сечениях, соответствующих местам наклейки тензорезисторов: а – по тензорезисторам Т-11–Т-13; б – по Т-10–Т-16

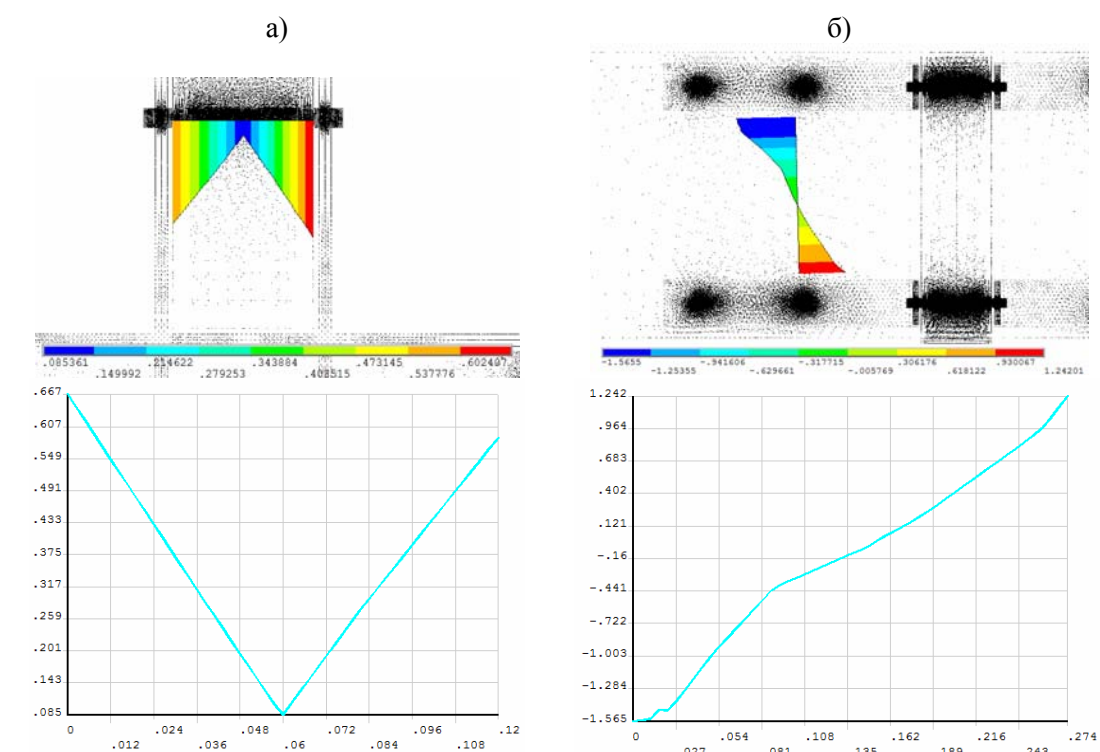


Рис. 4. Эпюры и графики распределения нормальных напряжений (МПа) при действии нагрузки по схеме №3 в сечениях, соответствующих местам наклейки тензорезисторов: а – по тензорезисторам Т-11–Т-13; б – по Т-19–Т-21

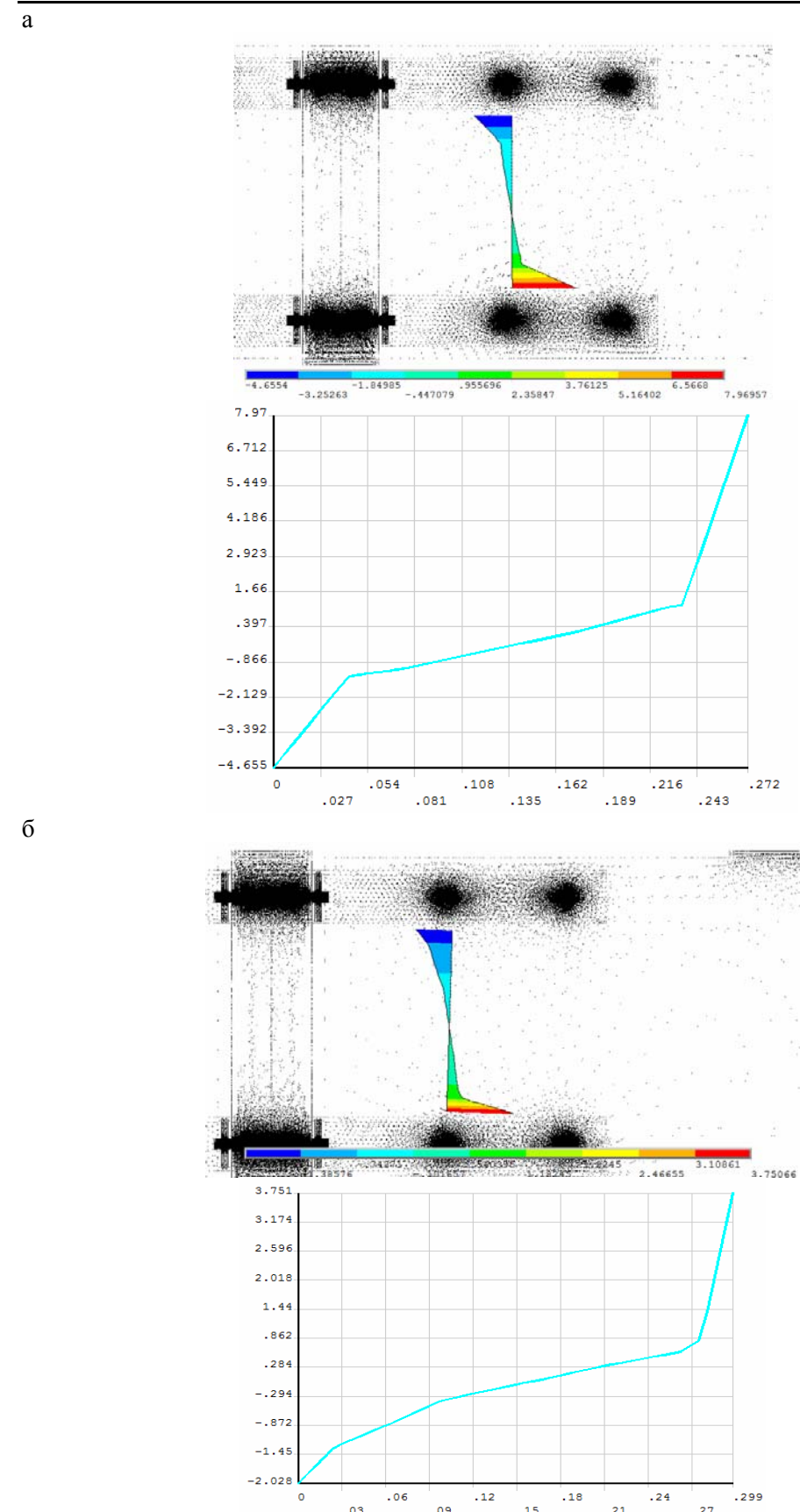


Рис. 5. Эпюры и графики распределения нормальных напряжений (МПа) при действии нагрузки по схеме №4 в сечениях, соответствующих местам наклейки тензорезисторов: а – по тензорезисторам Т-25–Т-27; б – по Т-28–Т-30



Таким образом, результаты расчетов по исследованию НДС клеёных деревянных элементов структуры с жесткими узлами, выполненные с применением комплексной программы ANSYS, показали хорошее совпадение их с ранее полученными экспериментальными данными, что подтверждает объективность принятых методов расчета. Получены картины распределения локальных напряжений в наиболее ответственных местах соединения элементов, что очень важно знать и учитывать в процессе проектирования жестких узлов балочных структур, выполненных с применением клеенных металлических шайб.

#### Список литературы

1. Вдовин, В.М. Экспериментальные исследования жёстких узлов балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С.130–137.
2. Вдовин, В.М. Оценка напряженно-деформированного состояния жесткого узла балочной структуры на клеенных стальных шайбах. / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №4. – С.61–69.
3. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.

#### References

1. Vdovin, V.M. Experimental studies hard knots of beam structures of glued wooden elements / V.M. Vdovin, D.D. Ishmaeva // Regional architecture and engineering. – 2014. – №2. – P.130–137.
2. Vdovin, V.M. Evaluation of the stress-strain state of the hard node beam structure glued on steel washers. / V.M. Vdovin, D.D. Ishmaeva // Regional architecture and engineering. – 2014. – №4. – P.61–69.
3. Vdovin, V.M. Welded metal washers in the compounds of wooden structures: monograph. / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ENGINEERING SYSTEMS

УДК 541.135.5

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

**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор,  
советник РААСН, действительный член  
Нью-Йоркской академии наук и Академии  
информатизации образования, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

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

**Koshev Alexander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemistry Science, Professor,  
Adviser of the Russian Academy of  
Architectural and Building the full member of  
the New York Academy of Sciences and  
Academy of information of education,  
Professor of the department «Information and  
computing systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ПРОТОЧНЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

А.Н. Кошев

Рассматриваются дифференциальные математические модели, описывающие электролиз в проточных трехмерных электродах, а также вопросы моделирования краевых и начальных условий для расчета процессов в электрохимических реакторах с учетом гидродинамических закономерностей протекания процессов электроосаждения.

*Ключевые слова:* электрохимический реактор, проточный трехмерный электрод, электролиз, математическая модель, дифференциальные уравнения, краевые условия

## SOME FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF EXTRACTION OF METALS FROM ELECTROLYTES ON FLOW- THROUGH THREE-DIMENSIONAL ELECTRODES

A.N. Koshev

Differential mathematical models describing electrolysis in flow-through three-dimensional electrodes and issues of modeling of boundary and initial conditions for the calculation of processes in electrochemical reactors with account of hydrodynamic regularities of the processes of electrodeposition are discussed.

*Keywords:* electrochemical reactor, flow-through three-dimensional electrode, electrolysis, mathematical model, differential equation, boundary conditions



Широкое применение электрохимических реакторов для извлечения металлов из растворов промышленных электролитов с целью их возвращения в технологический цикл или утилизации обуславливает необходимость изучения теоретических закономерностей процессов электролиза, технологий и режимов электроосаждения.

Объединяющим принципом функционирования электрохимических реакторов является, очевидно, электрохимический механизм протекающих в них реакций. При этом скачок потенциала на границе раздела фаз в электрохимической системе является определяющим фактором, регулирующим как скорость реакции, так и качество получаемого продукта. Для многих типов электрохимических реакторов существует проблема равномерности распределения потенциалов реакций на электродах, что, как правило, ограничивает полезные размеры электродов. Распределение потенциала, в свою очередь, определяется несколькими факторами, основными из которых являются электропроводные свойства твердой и жидкой фаз электрохимической системы, электрохимические свойства границы раздела фаз системы, а также режимы электролиза (электрический, гидродинамический, температурный и т.п.). Очевидно, что для совершенствования работы электрохимических реакторов, независимо от их назначения и принципов организации электрохимической реакции, необходимы, во-первых, развитие научных представлений о природе электрохимической реакции, влияния на ее эффективность токовых, гидродинамических, диффузионных и других составляющих электрохимического процесса, а во-вторых, развитие теории математических моделей и методов расчета, наиболее благоприятных режимов осаждения, с учетом энергетических и гидродинамических возможностей реакторов, а также элементов их конструкций. При этом, если первое из перечисленных направлений научных исследований характерно для электрохимических реакторов любого типа, то второе является более дифференцированным в силу разнообразия типов электролизеров, их назначения и принципов организации электрохимического процесса.

#### Теоретические основы моделирования процессов, протекающих в объеме электролитов

В исследовании закономерностей поляризации электродов электрохимических реакторов широко используются методы математического моделирования распределения электрохимического процесса в объеме и на границе раздела фаз системы электрод – электролит.

Одними из первых работ в области физико-математического моделирования процессов, протекающих в порах ОПЭ, следует считать работы В.С. Даниель-Бека и А.Н. Фрумкина, которые, используя подход, предложенный Я.Б. Зельдовичем для описания структурно-сложных систем, аппроксимировали объемно-пористый электрод псевдогомогенной моделью, характеризующей набором эффективных параметров. В дальнейшем в работах О.С. Ксенжека, И.Г. Гуревича, В.С. Баготского, Ю.А. Чизмаджиева, R. Sioda, Kreysa G., Coeuret F., Newman J., Pollar R, Trainham J., P.Ю. Бека, Doherty T., Soleh M.M., Kuhn A., Oren J., А.И. Маслия, Н.П. Поддубного, В.К. Варенцова и др. была теоретически обоснована и экспериментально показана возможность эффективного восстановления электроактивных веществ на ОПЭ при малых концентрациях компонентов в растворе.

Математическое моделирование в электрохимической технологии осуществляется, как правило, в двух направлениях. Первое – экспериментально-статистическое. В этом случае закономерности распределения поляризации на электродах устанавливаются путем проведения серии экспериментов на конкретном исследуемом объекте с последующей их статистической обработкой. Основная сложность применения экспериментально-статистического подхода связана с необходимостью постановки значительного количества экспериментов, что в ряде случаев может оказаться затруднительным.

Второе направление можно назвать расчетно-исследовательским. В этом случае распределение тока и металла рассчитывается с помощью математических уравнений,

описывающих электрохимический процесс в любой момент времени проведения электролиза. При развитии второго направления возникают трудности другого характера, связанные с созданием новых и решением уже известных уравнений, описывающих распределение поля, электродные и диффузионные процессы во времени. Поэтому под математической моделью процесса электроосаждения металла следует понимать совокупность математических описаний процесса, приведенных к виду, приемлемому для их решения в комплексе с методами и алгоритмами расчетов по уравнениям математической модели.

В данной работе рассматривается в основном второе направление развития моделирования работы электрохимических реакторов.

Приведем основополагающие уравнения, на основе которых затем строятся и исследуются математические модели электролиза в различных электрохимических системах. При этом будем считать, что поток заряженных частиц  $i$ -го сорта  $N_i$  в объеме электролита определяется миграционной и конвективной составляющими, что реализуется в большинстве электрохимических реакторов с достаточным межэлектродным пространством или в условиях конвективного перемешивания:

$$N_i = Z_i \cdot U_i \cdot F \cdot C_i \cdot \Delta E + C_i \cdot V, \quad (1)$$

где  $Z_i$ ,  $U_i$ ,  $C_i$  – соответственно заряд, подвижность и концентрация  $i$ -го электроактивного компонента;  $\Delta E$  – градиент потенциала электрического поля;  $V$  – вектор скорости конвективного переноса раствора.

Ток  $I$  в объеме электрод – электролит выражается суммой

$$I = F \sum_i Z_i \cdot N_i. \quad (2)$$

Условие материального баланса в отсутствие гомогенной химической реакции:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -\Delta N_i, \quad (3)$$

где  $\Delta N_i$  – дивергенция потока  $N_i$ .

Если система стационарна, то

$$\Delta N_i = 0. \quad (4)$$

Из (1) и (2) следует, что

$$I = -F^2 \cdot \Delta E \cdot \sum_i Z_i^2 \cdot U_i \cdot C_i + F \cdot V \cdot \sum_i Z_i \cdot C_i \quad (5)$$

или

$$I = -\kappa \cdot \Delta E + F \cdot V \cdot \sum_i Z_i \cdot C_i, \quad (6)$$

где  $\kappa = F^2 \cdot \sum_i Z_i^2 \cdot U_i \cdot C_i$  – проводимость раствора.

Умножая каждый член (4) на  $Z_i F$  и суммируя по  $i$  совместно с (2), получаем:

$$\Delta I = 0 \quad (7)$$

или

$$\Delta \cdot \left( -\kappa \cdot \Delta E + F \cdot V \cdot \sum_i Z_i \cdot C_i \right) = 0. \quad (8)$$

Дальнейшее преобразование уравнения (8) зависит от того, реализуется ли в данной электрохимической системе условие электронейтральности  $\sum_i Z_i \cdot C_i = 0$ .

Принято считать, что в растворах электролитов это условие выполняется во всем объеме, за исключением двойного слоя вблизи электродов и других границ раздела

фаз. Однако условие  $\sum_i Z_i C_i = 0$  не выполняется при электроосаждении металлов в

псевдогомогенных системах, например, на объемно-пористые электроды, где с точки зрения макрокинетики можно предположить наличие скачка потенциала на границе твердый электрод – электролит в каждом элементарном объеме электродного пространства.

#### Моделирование электрохимических систем с псевдогомогенным реакционным пространством

Нарушение электронейтральности в некоторой точке пространства в обобщенном понимании свидетельствует о наличии в этой точке положительного или отрицательного источника заряженных частиц. Не рассматривая многообразие возможных причин возникновения таких ситуаций, остановимся на случае, когда электролитическая система представляет собой псевдогомогенную среду, например объемно-пористый электрод, заполненный электролитом, можно рассматривать как однородную среду с усредненными эффективными электрохимическими и диффузионными характеристиками. Такой подход впервые предложен Я.Б.Зельдовичем и успешно применяется для моделирования псевдогомогенных систем [1].

Естественно предположить в такой модельной среде наличие скачка потенциала на границе «твердый электрод – электролит» в каждом элементарном объеме электродного пространства, т.е. в каждой точке электрохимической системы возможны электродные реакции, что влечет невыполнение условия  $\sum_i Z_i \cdot C_i = 0$ .

Выполним дальнейшие преобразования уравнения (8) с учетом этого факта.

Распишем уравнение (8) согласно правилам дивергенции суммы произведений векторных и скалярных величин:

$$\Delta \cdot (-\kappa \cdot \Delta E) + F \sum_i Z_i \cdot C_i \cdot \Delta V + V \Delta \left( F \sum_i Z_i \cdot C_i \right) = 0. \quad (9)$$

В условиях несжимаемости системы  $\Delta V = 0$ , что позволяет упростить (9):

$$\Delta \cdot (-\kappa \cdot \Delta E) + V \cdot \Delta \left( F \sum_i Z_i \cdot C_i \right) = 0. \quad (10)$$

Отметим, что в рамках сделанных предположений о псевдогомогенности системы градиенты концентраций для компонентов, принимающих участие в электродных реакциях,  $\Delta C_i \neq 0$ . Расписывая второй член суммы в (10), получаем:

$$\Delta \cdot (-\kappa \cdot \Delta E) + \sum_k F \cdot Z_k \left( \frac{\partial C_k}{\partial x} \cdot V_x + \frac{\partial C_k}{\partial y} \cdot V_y + \frac{\partial C_k}{\partial z} \cdot V_z \right) = 0. \quad (11)$$

Здесь суммирование ведется по тем компонентам, концентрации которых меняются в процессе движения раствора в объеме электрода.

Рассмотрим второй член суммы в уравнении (11):

$$\frac{\partial C_k}{\partial x} \cdot V_x + \frac{\partial C_k}{\partial y} \cdot V_y + \frac{\partial C_k}{\partial z} \cdot V_z = |V| \cdot \left( \frac{\partial C_k}{\partial x} \cdot \cos \alpha + \frac{\partial C_k}{\partial y} \cdot \cos \beta + \frac{\partial C_k}{\partial z} \cdot \cos \gamma \right) = |V| \cdot \frac{\partial C_k}{\partial r}, \quad (12)$$

где  $\vec{r}$  – направление протока раствора.

Аналогично [2] нетрудно получить следующее соотношение:

$$\frac{\partial C_k}{\partial r} = \frac{S_v}{|V| \cdot Z_k \cdot F} \cdot j, \quad (13)$$

где  $S_v$  – реакционная поверхность;  $j$  – плотность поляризующего тока по  $K$ -му компоненту.

Подстановка (12) и (13) в (11) дает:

$$\Delta \cdot (-\kappa \cdot \Delta E) + \sum_k S_v \cdot j = 0. \quad (14)$$

Удельная электропроводность среды  $\kappa = \frac{1}{\rho}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление.

Электропроводные свойства рассматриваемой псевдогомогенной среды в каждом ее элементарном объеме естественно моделировать двумя последовательно соединенными проводниками [3], характеризующими твердую и жидкую фазы системы:  $\rho = \rho_T + \rho_{\text{ж}}$ .

Тогда  $\kappa = \frac{1}{\rho_T + \rho_{\text{ж}}}$  и, следовательно,

$$\Delta \cdot \left( -\frac{1}{\rho_T + \rho_{\text{ж}}} \cdot \Delta E \right) + \sum_k S_v \cdot j = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) совместно с уравнением (13) и кинетическим уравнением, связывающим  $j$  и  $E$ , дает возможность рассчитывать распределение потенциала, плотности тока и концентрации в объеме пористого электрода. При этом система уравнений (13) и (15) должна быть дополнена естественными граничными условиями, аналогичными начальным условиям [1]:

$$\frac{\partial E}{\partial n} \Big|_{\sigma_k} = J \rho_{\text{тв}}; \quad \frac{\partial E}{\partial n} \Big|_{\sigma_a} = -J \rho_{\text{ж}}; \quad \frac{\partial E}{\partial n} \Big|_{\sigma_{\text{и}}} = 0; \quad C \Big|_{\sigma_{\text{и}}} = C_0, \quad (16)$$

где  $J$  – плотность тока, подаваемого на электрод;  $\vec{n}$  – направление нормали к границе  $\sigma = \sigma_k + \sigma_a + \sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{п}}$ ;  $\sigma_k$  – часть поверхности электрода, через которую осуществляется токоподвод;  $\sigma_a$  – токоотвод;  $\sigma_{\text{и}}$  – изолятор;  $\sigma_{\text{п}}$  – поверхность катода, через которую организован проток электролита.

Вопрос о разрешимости уравнений (15) очень сложен и в общем случае не решен. Однако для достаточно малых поляризаций электрода зависимость ток – потенциал допускает линеаризацию, что позволяет рассматривать задачу (15) как известную в математике задачу Штурма – Лиувилля, для которой при определенных условиях разрешимость доказана.

Впервые задачу о количественном расчете распределения потенциала по глубине пористого электрода сформулировал В.С.Даниель-Бек, А.Н.Фрумкин обосновал правомерность одномерной модели. Дальнейшее развитие такой подход получил в работах Ксенжека, Стендера, Гуревича, Баготского, Чизмаджиева и др.

Когда скорость электродной реакции лимитируется массопереносом, естественно использовать режим протока раствора сквозь пространство катода. Задача о работе объемно-пористого электрода при конвективной подаче электролита в наиболее общем виде поставлена в [4].

В некоторых предельных случаях возможно аналитическое решение одномерной модели, например, в области малых поляризаций [5]. Попытка учесть связь тока с приложенным потенциалом и факторами, лимитирующими массоперенос в случае больших поляризаций, предпринята в ранних работах R. Sioda. Анализ решений задачи в предельных случаях дает иногда наглядную картину взаимосвязи отдельных исследуемых факторов процессов, однако при обобщении задачи ее решение может усложниться настолько, что окажется непригодным для аналитического исследования.

Одним из важных факторов, влияющих на распределение и интенсивность электрохимического процесса внутри пористого электрода, является соотношение электропроводностей твердой  $\kappa_T$  и жидкой  $\kappa_{\text{ж}}$  фаз системы электрод – электролит. Известно из классической теории, что в случае, когда  $\kappa_T$  и  $\kappa_{\text{ж}}$  соизмеримы, электродные реакции наиболее эффективно протекают и у наружной, и у внутренней поверхностей. Внутри пористого электрода при этом наблюдается минимум поляризации. В наиболее общем виде задача с учетом соотношения электропроводностей твердой и жидкой фаз

рассмотрена в работах Даниель-Бека, где показано, что в результате омического падения потенциала как в жидкой, так и в твердой фазе положение минимума поляризации внутри пористого электрода зависит от соотношения величин  $\kappa_T$  и  $\kappa_{ж}$ .

Исходя из этого факта авторы работы [6] попытались рассчитать зависимость  $\kappa_T(x)$ , где  $x$  – координата по толщине электрода, с целью повысить эффективность работы пористого электрода. Следует, однако, отметить, что подход, предложенный в [6], может быть использован только в случаях, когда электропроводность твердой фазы не зависит от времени электролиза (например, не происходит осаждения металла).

Решить краевую задачу для уравнения (15) в общем виде можно, используя численные методы решения дифференциальных уравнений. Так, в работах [1, 2, 4] учтены при моделировании химическая и концентрационная поляризация, омические потери в жидкой и твердой фазах, а также, что очень важно, протекание параллельной реакции выделения водорода.

Отметим, что для адекватного описания реальных электрохимических процессов в порах проточных объемно-пористых электродов состояние электрода необходимо рассматривать как нестационарное.

#### Описание электрохимических реакций на твердых электродах как краевых и начальных условий

Рассмотрим описание электродных реакций с точки зрения их использования как краевых условий при решении задач по расчету электрохимических процессов в электрохимических реакторах.

Как известно, вид зависимости  $E = f(j)$  потенциала электрода  $E$  от плотности тока на электроде  $j$  во многих случаях определяет математическую постановку задачи по расчету электрохимической системы, сложность решения такой задачи и метод ее решения. Чаще всего зависимость ток – потенциал описывается общим уравнением электрохимической кинетики:

$$j = j_0 \cdot \left[ \frac{C_0^S}{C_0^0} \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot Z \cdot F \cdot (E - E_p)}{R \cdot T}\right) - \frac{C_R^S}{C_R^0} \cdot \exp\left(-\frac{(1-\alpha) \cdot Z \cdot F \cdot (E - E_p)}{R \cdot T}\right) \right]; \quad (17)$$

здесь  $C_0$ ,  $C_R$  – концентрации окислителя и восстановителя у электрода ( $C^S$ ) и в объеме раствора ( $C^0$ );  $j_0$  – ток обмена электрохимической реакции;  $\alpha$  – коэффициент переноса;  $Z$  – количество электронов, принимающих участие в реакции;  $E_p$  – равновесный потенциал реакции;  $R, F, T$  – физические константы.

Следует отметить, что уравнение (17) является в некотором смысле обобщающим, многие электрохимические параметры имеют свою сложную природу и в общем смысле не являются константами. Уравнение (17) записано для случая одностадийной электрохимической реакции. Очевидно, что для более сложных случаев уравнение смешанной кинетики приобретает более сложный вид. Кроме того, для различных специальных случаев электрохимических реакций уравнение (17) может существенно трансформироваться. Однако изучение применимости этого уравнения в качестве краевого условия позволяет учесть некоторые общие рекомендации для использования зависимости ток – потенциал при моделировании электрохимических систем.

При использовании уравнения (17) сложным является вопрос об определении электрохимических параметров, участвующих в уравнении, таким образом, чтобы математическая модель адекватно описывала реальный электрохимический процесс.

Простейшим способом определения электрохимических параметров  $\alpha$ ,  $j_0$  является построение тафелевских прямых для достаточно больших стационарных значений потенциала электрода. Этот метод описан во многих классических литературных источниках. Несмотря на то что формулы Тафеля реализуются при достаточно простых условиях протекания электрохимической реакции, метод может оказаться достаточно точным и в сложных случаях определения эффективных значений электрохимических

параметров. Его удобно также использовать при определении начальных значений  $\alpha$ ,  $j_0$  для последующего их уточнения более сложными методами.

Использование тафелевских прямых для описания электрохимических реакций невозможно, когда в процессе электролиза меняется концентрация окислителя, например, в результате обеднения электролита электроактивными компонентами. Рассмотрим такую ситуацию для случая, когда диффузия к электроду не является лимитирующей стадией:

$$j = j_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{\alpha \cdot Z \cdot F \cdot (E - E_p)}{R \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{(\alpha-1) \cdot Z \cdot F \cdot (E - E_p)}{R \cdot T}\right) \right]. \quad (18)$$

Известно, что с изменением концентрации рассматриваемых электроактивных компонентов  $C_0$  и  $C_R$  меняются и равновесный потенциал электрода

$$E_p = E_p^0 + \frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \ln \frac{C_0}{C_R}, \quad (19)$$

и ток обмена

$$j_0 = Z \cdot F \cdot K_S \cdot C_0^{1-\alpha} \cdot C_R^\alpha. \quad (20)$$

Здесь  $E_p^0$  – стандартный потенциал;  $K_S$  – некоторая изменяемая константа.

С учетом (19) и (20) уравнение (18) преобразуется к виду:

$$j = j_0^0 \cdot C_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot Z \cdot F}{R \cdot T} \cdot (E - E_p^0)\right) - j_0^0 \cdot C_R \cdot \exp\left(\frac{(\alpha-1) \cdot Z \cdot F}{R \cdot T} \cdot (E - E_p^0)\right), \quad (21)$$

$$\text{где } j_0^0 = Z \cdot F \cdot K_S = \frac{j_0}{C_0^{1-\alpha} \cdot C_R^\alpha}.$$

В уравнении (21) параметры  $j_0^0$  и  $E_p^0$  не зависят от изменения концентраций реагентов, а следовательно, использование уравнения (21) в качестве краевого условия уменьшает погрешность модели, повышает ее адекватность реальному процессу.

Особенно существенна необходимость учета изменения  $E_p$  в зависимости от концентрации реагента в случае электроосаждения металла в порах проточного объемно-пористого электрода (ПТЭ). В таком случае возможны изменения концентрации за проход через электрод более чем на порядок, а погрешность вычислений при неучете зависимости  $E_p(C_0)$  может даже изменить качественную картину распределения процесса по толщине электрода. В некоторых случаях зависимость  $E_p(C_0)$  можно учесть в модельных уравнениях, например в случае одномерной модели однокомпонентного электролиза в порах ПТЭ. Вид зависимости поляризации от плотности тока в различных точках  $x$  ПТЭ известен:

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} = S_V \left( \frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) j(x), \quad (22)$$

однако это уравнение получено при условии, что  $E_p = \text{const}$ .

В более общем виде:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = S_V \left( \frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) j(x). \quad (23)$$

Если учесть, что

$$E(x) = \eta(x) + E_p^0 + \frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \cdot \ln \frac{C(x)}{C_0},$$

то относительно поляризации  $\eta(x)$  уравнение (23) должно быть записано в виде:

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} + \frac{R \cdot T}{Z \cdot F} \left( \frac{1}{C(x)} \cdot \frac{d^2C}{dx^2} - \frac{1}{C(x)^2} \left( \frac{dC}{dx} \right)^2 \right) = S_v \left( \frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_{\text{ж}}} \right) j(x). \quad (24)$$

Использование для расчетов уравнения (24) особенно эффективно для однокомпонентных систем, т.к. не требует определения  $E_p$ .

Существенные сложности при формировании краевых условий для решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы электроосаждения, возникают при расчете многокомпонентных электрохимических реакций. Особенно это касается определения равновесных потенциалов при совместном разряде нескольких компонентов. В этом случае равновесные потенциалы электрохимических реакций существенно зависят от характера взаимодействия между компонентами и вида образующегося сплава. При этом происходит смещение  $E_p$  для каждого из осаждающихся металлов. Обозначим эти величины  $E_p^i$  и будем определять их значения методом наименьших квадратов, используя экспериментальную информацию об изменении  $C_i(x)$  на выходе электрода ( $x=L$ ). Для этого составим сумму квадратов разностей между экспериментальными и расчетными значениями  $C_i^{\text{э}}(L)$  и  $C_i^{\text{р}}(L)$ :

$$S \cdot (E_p^1, E_p^2, \dots, E_p^n) = \sum_{i=1}^n (C_i^{\text{р}}(L) - C_i^{\text{э}}(L))^2. \quad (25)$$

Минимизируем  $S$  по переменным  $E_p^i$ , предварительно задавшись некоторыми эффективными значениями остальных электрохимических констант. Нетрудно доказать, что такой способ приводит к однозначному определению величин  $E_p^i$ . Действительно, предположим, что нашлись два набора значений  $E_p^i$  и  $\bar{E}_p^i$  такие, что  $C_i(L, E_p^i) = C_i(L, \bar{E}_p^i)$ . Тогда получим два набора значений  $\eta_1^i$  и  $\eta_2^i$  таких, что  $j_i(\eta_1^i(L)) = j_i(\eta_2^i(L))$ . Рассмотрим поведение функции  $j_i(\eta(L)) = j_i(\eta_L)$ . Так как  $C_i(\eta_L) = \text{const}$ , то производная  $j'_{i,\eta_L}(\eta_L)$  определяется выражением

$$j'_{i,\eta_L}(\eta_L) \cong \frac{2 \cdot j_{i,0} \cdot k_2^i \cdot k_3^i \exp(2 \cdot k_2^i \cdot \eta_L)}{(1 + k_3^i \exp(k_2^i \cdot \eta_L))^2}, \quad k_2^i > 0, \quad k_3^i > 0.$$

Из соотношения следует, что  $j'_{i,\eta_L}(\eta_L) > 0$  для всех  $\eta_L$ . Значит,  $j_i(\eta_L)$  – строго возрастающая функция от  $\eta_L$  и равенство  $j_i(\eta_{L,1}) = j_i(\eta_{L,2})$  возможно только тогда, когда  $\eta_{L,1} = \eta_{L,2}$ . Это означает, что  $E_p^i = \bar{E}_p^i$ , и свидетельствует об однозначности определения  $E_p$ .

Особой тщательности требует подбор краевых условий, а следовательно, и определение электрохимических параметров при использовании нестационарных режимов электроосаждения. В этом случае может возникнуть ситуация, когда ток обмена, коэффициент переноса и другие параметры существенно зависят от области значений поляризации электрода. Такая ситуация рассматривается, например, в работе [7]. Это явление можно объяснить несколькими причинами, например стадийным переносом электронов. К изменению кинетических параметров при изменении потенциала электрода может привести изменение состава и структуры двойного слоя. Очевидно, для точного описания процесса необходимо использовать кинетические параметры, зависящие от потенциала, т.е. использовать их различные значения в разных областях изменения поляризации электрода. В первую очередь это относится к процессам электроосаждения реверсированным током, когда переходное время установления стационарного значения потенциала электрода соизмеримо с длительностью периодов.

Простейшим способом определения кинетических параметров в случае их зависимости от поляризации является обработка тафелевских прямых в различных областях изменения потенциала. Возможно дальнейшее их уточнение методом наименьших квадратов с использованием экспериментально найденной и теоретически рассчитанной потенциодинамических кривых [7].

Эффективным нам представляется сложный, но более точный подход к определению кинетических параметров нестационарных электрохимических процессов. В этом случае используется математическая модель, основанная на совместном решении нестационарного уравнения диффузии и общего электрохимического уравнения смешанной кинетики (17) для плоскопараллельных электродов при кусочно-линейной зависимости плотности наложенного на электрохимическую ячейку тока от времени [8].

По уравнениям математической модели и экспериментально найденной гальванодинамической кривой зависимости потенциала от плотности тока методом наименьших квадратов определяются эффективные значения электрохимических параметров в различных областях изменения электрического тока. Выбор кусочно-линейного гальванодинамического режима обусловлен возможностью в этом случае представить решение в аналитической форме, в которую линейно входят значения катодной и анодной плотностей тока, что, в свою очередь, позволяет однозначно и с большой степенью точности определить электрохимические параметры.

#### Моделирование локальной гидродинамики процесса

Рассмотрим влияние на поляризационную зависимость плотности тока от поляризации в проточных трехмерных электродах гидродинамических условий протекания электролиза. Зависимость плотности тока на электроде от его поляризации запишем в виде:

$$j(x) = \frac{j_0 [e^{M_1} - e^{M_2}] j_{\text{пред}}}{j_0 e^{M_1} + 1}, \quad (26)$$

$$\text{где } M_1 = \frac{\alpha z F (E(x) - E_p(x))}{RT}, \quad M_2 = \frac{(1 - \alpha) z F (E(x) - E_p(x))}{RT}, \quad j_{\text{пред}} = z F C(X) k_m,$$

а  $k_m$  – коэффициент массопереноса, вид которого для ПТЭ в том числе и для углеродных волокнистых материалов определен следующей зависимостью [9]:

$$k_m = a \cdot u^b. \quad (27)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  в (27) представляют собой некоторые константы, имеющие определенные значения для материалов выбранного вида. Так, коэффициент  $a$  отражает свойства электрода и жидкости и зависит от пористости электрода, размера и конфигурации элементов пористого слоя, кинематической вязкости раствора, коэффициента диффузии. Показатель  $b$  отражает гидродинамический режим течения раствора и может колебаться от 0.3 для ламинарного потока до 0.8–1.0 для турбулентного потока. Экспериментальные данные, приведенные в [9], показывают, что значения  $b$  в случае ламинарного потока составляют 0,33–0,37, в случае турбулентного потока – 0,49–0,71; коэффициент  $a$  изменяется в пределах  $10^{-3}$ – $1.9 \cdot 10^{-2}$ .

В некоторых работах, например в [10], коэффициент массопереноса предлагается рассчитывать по формуле, в которой присутствуют константа вязкости, коэффициент диффузии, диаметр углеграфитового волокна с осажденным на него металлом и линейная скорость протока. Однако, очевидно, что эффективный коэффициент диффузии, как и коэффициент массопереноса, будет зависеть от степени перемешивания, то есть и от скорости протока, и от свойств углеграфитового материала, что приводит к затруднениям при численных расчетах.

Рассмотрим гидродинамические модели процессов, имеющих место в некотором элементарном объеме ПТЭ, с точки зрения влияния этих гидродинамических закономерностей на уравнение поляризационной кривой.

Изменение концентрации осаждаемого металла  $c$  в объеме электролита описывается уравнением конвективной диффузии [11]:

$$\Delta c = Pe \cdot (V \cdot \nabla) c. \quad (28)$$

Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\nabla$  – дивергенция вектора, записанные для соответствующей системы координат,  $V$  – вектор скорости движения жидкости,  $Pe$  – число Пекле.

Будем считать, что в выбранном элементарном объеме среды происходит обтекание электролитом цилиндрической нити радиуса  $r_0$ , что схематично изображено на рисунке.

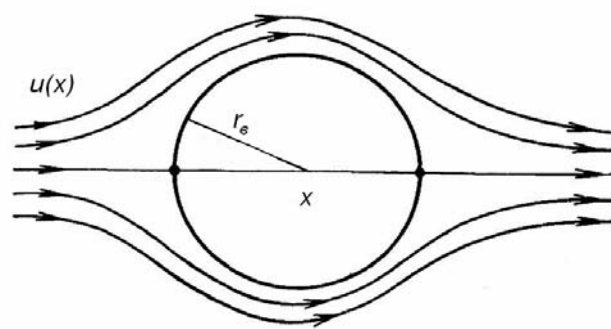


Схема движения электролита при обтекании цилиндрической нити

Уравнение (28) в одномерном случае упрощается до следующего:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + Pe \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0. \quad (29)$$

Здесь  $\xi$  – линейная координата в выбранном элементарном объеме,  $c(\xi) = \frac{C_\infty - C(\xi)}{C_\infty}$ ;

$Pe = \frac{r_0 u}{D}$ ;  $C_\infty$  – концентрация электролита в точке ПТЭ, которая отождествляется с выбранным элементарным объемом порового пространства. На поверхности нити при  $\xi = 0$  задается условие

$$\frac{\partial c}{\partial \xi} = -k_s f_s(c), \quad (30)$$

где  $k_s$  – константа скорости поверхностной электрохимической реакции, а  $k_s f_s(c)$  – безразмерная функция, соответствующая скорости поверхностной электрохимической реакции:

$$f_s(c) = 1 - \frac{c(\xi) e^{M_1}}{e^{M_1} - e^{M_2}}. \quad (31)$$

Решая уравнение (30) и подставляя все необходимые константы, после несложных преобразований получаем выражение для плотности тока:

$$j(x) = \frac{Pe j_0 j_{np} [e^{M_1} - e^{M_2}]}{Pe j_{np} + j_0 e^{M_1}}. \quad (33)$$

Выражение (33) в отличие от известного выражения (26) не содержит трудновычисляемую функцию  $k_m(x)$  и значительно удобнее при математическом моделировании процессов в электрохимических системах с проточными трехмерными электродами.

Вычисление начального значения потенциала электрода

Для решения уравнения (15) необходимы начальные условия:  $E(0) = E_0$  и  $\frac{dE}{dx}(0) = E'_0$ . Из теории распределения потенциала на ПТЭ известны условия на производную функции  $E$ , заданные на концах интервала интегрирования уравнения:

$$\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J}{\kappa_T}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{J}{\kappa_{\text{ж}}};$$

здесь  $J$  – габаритная плотность тока, проходящего через ПТЭ.

При численном решении уравнения (15), как правило, используется так называемый «метод стрельбы», когда случайным образом задается недостающее условие  $E(0) = E_0$ , решается задача Коши с условиями  $E(0) = E_0$  и  $\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J}{\kappa_T}$ , производная от

полученного решения сравнивается на конце интервала с заданным условием  $\frac{dE}{dx}(L) = \frac{J}{\kappa_{\text{ж}}}$ , и, если совпадение в пределах точности неудовлетворительное, то меняется значение  $E_0$  и вся процедура повторяется до достижения удовлетворительного результата.

Нами предлагается следующий подход к формированию значения  $E(0)$ . Уравнение (18) перепишем в следующем виде:

$$j_s(x) = j_0 (e^{AE(x)} - e^{-CE(x)}),$$

где  $A = \frac{\alpha z F}{RT}$ ,  $C = \frac{(1-\alpha) z F}{RT}$ ,  $B = \left( \frac{1}{\kappa_T} + \frac{1}{\kappa_{\text{ж}}} \right) S_V$ . Тогда из уравнения (23) можно получить:

$$\left( \frac{dE}{dx} \right) d \left( \frac{dE}{dx} \right) = B j_0 (e^{AE(x)} - e^{-CE(x)}) dE.$$

После интегрирования этого равенства в пределах от  $E(0)$  до  $E(x^*)$ , где  $x^*$  – точка минимума функции  $E(x)$ , получим соотношение

$$\frac{1}{\kappa_T^2} + 2B j_0 \left( \frac{1}{A} \left( \frac{e^{AE(x^*)}}{J^2} - \frac{e^{AE(0)}}{J^2} \right) + \frac{1}{C} \left( \frac{e^{-CE(x^*)}}{J^2} - \frac{e^{-CE(0)}}{J^2} \right) \right) = 0.$$

Учитывая, что при больших плотностях габаритного тока  $E(x^*)$  много меньше, чем  $E(0)$ , можно записать приближенное равенство:

$$E(0) \approx \frac{2}{A} \ln \left( \frac{A J}{2 \kappa_T^2 B j_0} \right).$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе предлагается рассматривать математические модели электродных реакций как математические описания, необходимые при формировании краевых и начальных условий для решения задач по расчету процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами.

Выявлены некоторые закономерности и исследовано влияние потока электролита в проточном трехмерном электроде на вид поляризационной зависимости плотности тока от потенциала. Выведены необходимые уравнения связи плотности тока и потенциала электрода с учетом скорости потока раствора.



Предложены способы определения кинетических и других параметров, необходимые при математическом моделировании электролиза в проточных трехмерных электродах и позволяющие с большой степенью адекватности моделировать реальные электрохимические процессы.

#### Список литературы

1. Koshev A.N., Chirkina M.A., Varentsov V.K. // Rus. J. Electrochemistry. – 2007. – V. 43. – № 11. – P. 1299.
2. Koshev A.N., Varentsov V.K., and Chirkina M.A. // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. – 2009. – Vol. 45. – P. 494.
3. Кошев А.Н., Варенцов В.К., Глейзер Г.Н. // Электрохимия. – 1992. – Т. 28, №8. – С. 1170.
4. Кошев А.Н., Варенцов В.К., Сухов И.Ф., Гвоздева И.Г. // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 25, №2. – С. 110.
5. Кошев. А.Н., Варенцов В.К., Гвоздева И.Г. // Вестник технологического университета Подолье. – 2003. – №4. – С.184.
6. Маслий А.И., Поддубный Н.П., Медведев А.Ж. // Электрохимия. – 2005. – Т.41. – С. 1335.
7. Липатова Т.В., Соркин Г.Н., Поддубный Н.П., Кошев А.Н. // Изв.Сиб.отд. АН СССР, сер.хим.наук. – 1979. – Вып.6. – С. 36.
8. Кузина В.В., Замятин А.П., Кошев А.Н. // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – №11. – С. 38.
9. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Трехмерные проточные электроды / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2005. – Ч.1. – 120 с.
10. Маслий А.И., Поддубный Н.П., Медведев А.Ж. // Электрохимия. – 2005. – Т. 41, №3. – С. 333.
11. Дильман В.В., Полянин А.Д. Методы модельных уравнений и аналогий в химической технологии. – М.: Химия, 1988. – 304 с.

#### References

1. Koshev A.N., Chirkina M.A., Varentsov V.K. // Rus. J. Electrochemistry. – 2007. – V. 43. – № 11. – P. 1299.
2. Koshev A.N., Varentsov V.K., and Chirkina M.A. // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. – 2009. – Vol. 45. – P. 494.
3. Koshev, A.N., Varentsov, V.K. Gleizer G.N. // . Electrochemistry. – 1992. – V. 28, №8. – P. 1170.
4. Koshev A.N., Varentsov V.K., Sukhov I.F., Gvozdeva I.G. // Mathematical modeling. – 2012. – V. 25, №2. – P. 110.
5. Koshev A.N., Varentsov V.K., Gvozdeva I.G. // Bulletin University of technology Podolie. – 2003. – №4. – P.184.
6. Maslii A.I., Poddubnyi N.P., Medvedev A.Zh. // Electrochemistry. – 2005. – V.41. – P. 1335.
7. Lipatova T.V., Sorkin G.N., Poddubnyi N.P., Koshev A.N. // News From SD AN USSA, series of chemical Sciences. – 1979. – №6. – P. 36.
8. Kuzina V.V., Zamyatin A.P., Koshev A.N. // Automation and modern technology. – 2008. – №11. – P. 38.
9. Varentsov, V.K.. Modern problems of technical electrochemistry. Three-dimensional flow-through electrode / V.K. Varentsov. – Novosibirsk: Publishing house of Novosibirsk state technical University, 2005. – Part 1. – 120 p.
10. Maslii A.I., Poddubnyi N.P., Medvedev A.Zh. // Electrochemistry. – 2005. – V.41, №3. – P. 333.
11. Dilman V.V., Polyanin A.D. Methods of modeling equations and analogies in chemical engineering. – M.: Chemistry, 1988. – 304 p.

УДК 628.316.12

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

**Вилкова Наталья Георгиевна**,  
доктор химических наук, профессор  
E-mail: ngvilkova@mail.ru  
**Дорчина Ольга Васильевна**,  
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

**Карев Максим Николаевич**,  
студент  
E-mail: rom\_maks1994@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

**Vilkova Natalya Georgievna**,  
Doctor of chemistry, Professor  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

**Dorchina Olga Vasilyevna**,  
Assistant of professor of the department  
«Physics and chemistry»  
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

**Shumkina Anna Aleksandrovna**,  
Associate Professor of the department  
«Physics and chemistry»  
E-mail: postmaster @ pgasa.penza.com.ru

**Karev Maksim Nikolaevich**,  
Student  
E-mail: rom\_maks1994@mail.ru

## ОЧИСТКА СТОЧНОЙ ВОДЫ ОТ РАСТВОРЕННОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Н.Г. Вилкова, О.В. Дорчина, А.А. Шумкина, М.Н. Карев

Определены условия эффективного выделения растворенного в воде дизельного топлива с использованием ионогенного ПАВ – додецилсульфата натрия и желатины. Установлена зависимость устойчивости пены и величины поверхностного натяжения от pH раствора и определен оптимальный состав водного раствора «желатина – ПАВ» для полного извлечения растворенного в воде органического вещества. Показано, что снижение концентрации растворенных углеводородов коррелируется с уменьшением межфазного натяжения на границе раздела «водный раствор/дизельное топливо» при  $\text{pH} \approx 7$  и определяется отношением массовых содержаний желатины и ПАВ. Максимальное снижение концентрации дизельного топлива достигается при соотношении «белок/ПАВ» в исходном растворе, равном 1,74 (в области образования поверхностно-активных комплексов желатины и додецилсульфата натрия).

*Ключевые слова: сточные воды, очистка, дизельное топливо, пена, ионогенное ПАВ, желатина, поверхностное натяжение*

## CLEANING WASTE WATER FROM DISSOLVED DIESEL FUEL

N.G. Vilkova, O.V. Dorchina, A.A. Shumkina, M.N. Karev

The conditions for efficient separation of dissolved diesel fuel using an ionic surfactant – sodium dodecyl sulfate and gelatine solution are determined. The dependence of foam stability and the surface tension on the hydrogen index and optimal composition of the aqueous solution of «gelatin – surfactant» for complete extraction of dissolved organic matter are determined. Reduction of dissolved hydrocarbon correlates with decrease of interfacial tension at the interface of the aqueous «solution/diesel» fuel when  $\text{pH} \approx 7$  and is determined by the weight ratio of gelatine and surfactant. Maximum decrease of dissolved diesel fuel is dot when the ratio of «protein/surfactant» in the initial solution is equal to 1,74, i.e. in the formation of the surfactant complexes gelatine- sodium dodecyl sulfate.

*Keywords: diesel fuel, foam, ionic surfactant, gelatine, surface tension*

Наиболее распространенными загрязнителями сточных вод являются нефтепродукты – группа углеводородов нефти, мазута, керосина, масел и их примесей, которые вследствие высокой токсичности отнесены к числу десяти наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Нефтепродукты могут находиться в растворах в эмульгированном, растворенном виде и образовывать на поверхности плавающий слой. В настоящее время защита окружающей среды от нефтесодержащих сточных вод – одна из главных задач.

В работе [1] предложен метод пенного концентрирования углеводородов желатиной из ее водных растворов с додецилсульфатом натрия. Наибольшая устойчивость такой пены и максимальный коэффициент пенного концентрирования белка из ее водного раствора с додецилсульфатом натрия, равный 150, достигалась при периодическом режиме пенообразования (в неподвижной пене) и соотношении концентраций желатина: ПАВ = 1,74, соответствующем их комплексообразованию. Полное связывание ПАВ желатиной с образованием поверхностно-активных комплексов наступало при соотношении концентраций (выраженных в мас. %)  $C_{\text{жел}}/C_{\text{ПАВ}}$ , равном 1,74 [2,3]. Образующиеся ассоциаты являются новым типом поверхностно-активного вещества. В процессе пенной флотации катионных и анионных ПАВ желатина использовалась в качестве собирателя: при pH менее 4,8 (активные группы желатины имеют положительный заряд) она способствовала извлечению анионных ПАВ, при pH более 4,8 (активные группы желатины имеют отрицательный заряд) – катионных ПАВ. Извлечение ПАВ желатиной также подтверждало образование малорастворимых хорошо флотирующихся комплексов белка и ПАВ.

Ниже устанавливается зависимость устойчивости пены и величины поверхностного натяжения от pH раствора при выделении растворенного в воде дизельного топлива (ДТ) поверхностно-активным веществом – додецилсульфатом натрия и желатиной и определен оптимальный состав водного раствора «желатина – ПАВ» для полного извлечения растворенного в воде органического вещества.

Использовали желатину техническую, анионный ПАВ-додецилсульфат натрия (DDSDa) марки «ч», сульфат алюминия марки «ч», дизельное топливо техническое.

Влияние углеводородов на устойчивость пен является сложным. Исследования в этой области проводили ранее при описании процессов пеногашения [4]. Установлено, что ряд веществ (бензол, толуол, диэтиловый эфир) практически не влияют на устойчивость раствора ионогенного ПАВ додецилсульфата натрия, если их добавляют в виде растворов, близких к насыщенным. Однако данные вещества становятся сильными пеногасителями, если система становится гетерогенной. Способность пены сохранять устойчивость в насыщенных антивспенивателях растворах открыта для большого ряда веществ. Известно, что капли органической жидкости приводят к формированию несимметричных пленок двух типов: капли находятся в дисперсионной среде пленки или на ее поверхности, образуя несимметричную пенную пленку. Свойства таких пленок, как правило, определяет в дальнейшем устойчивость пены в целом.

Сравнительную устойчивость пен, содержащих органическую фазу, определяли двумя методами: по высоте слоя динамической пены и времени жизни столба пены определенной высоты под действием приложенного перепада давления [1]. Применяя первый метод, использовали генератор ПОР-160 высотой 17,5 см и диаметром колонки 3,5 см. В генератор заливали исследуемый раствор высотой 1 см (объем жидкости 3,5 см<sup>3</sup>.) В колонку подавали воздух со скоростью 1 см<sup>3</sup>/с. Фиксировали время образования максимального столба пены и его устойчивость. По второму методу пену помещали в стеклянную ячейку с пористым фильтром. Под фильтром создавали пониженное (по сравнению с атмосферным) давление, равное 1 кПа. Фиксировали время полного разрушения столба пены, высотой 2 см.

Растворы для выделения растворенного нефтепродукта содержали желатину с массовым содержанием 0,008 %; 0,01 %; 0,1 % и додецилсульфат натрия с концентрацией 10<sup>-3</sup> моль/л и 2·10<sup>-3</sup> моль/л. В растворы добавляли 0,08 и 0,12 мл дизельного топлива с плотностью 0,788 г/мл, что соответствует массовому содержанию 0,32 % и

0,47 %. Изменение pH проводили добавлением 12 %-го раствора сульфата алюминия и двунормального раствора гидроксида натрия.

Концентрацию растворенного дизельного топлива в исходной воде и в воде после ее очистки определяли флуориметрическим методом. Экстракцию растворенных нефтепродуктов (НП) проводили гексаном. Для построения калибровки использовали стандартный образец раствора нефтепродуктов в гексане (номинальное значение массового содержания 1 мг/мл).

Поверхностное натяжение на границе раздела «раствор – воздух» и «раствор – дизельное топливо» проводили методом платиновой рамки [4, 5]. Исследовано влияние pH на процесс выделения бензола поверхностно-активным веществом и желатиной. Отмечено, что бензол не проявляет пеногасящего действия даже в насыщенных водных растворах. Показано, что при pH менее 4 добавление додецилсульфата натрия и желатины не приводит к заметному хлопьеобразованию (образуется опалесцирующий золь с размером частиц порядка 0.1 мкм); при пропускании воздуха через такую суспензию образуется грубодисперсная быстроразрушающаяся пена. При pH 5,3 устойчивость пены возрастает, идет образование нейтральных частиц сульфата алюминия примерного состава:  $[Al(H_2O)_3(OH)_3]$ , которые обладают высокой сорбционной емкостью. В этом случае количество остаточного бензола уменьшается в 1,3 по сравнению с исходным содержанием.

Для определения эффективности выделения дизельного топлива пеной, содержащей ионогенное ПАВ и желатину, изучали устойчивость динамической пены при изменении pH водного раствора (количество ДТ превышало растворимость нефтепродуктов приблизительно в 3 раза). Динамическая пена получена из водного раствора DDSDa (10-3 моль/л) и желатины (0,008 %). Содержание ДТ 0,47 % (растворы 1, 2) и 0,37 % растворы 3-6. Полученные результаты представлены в таблице.

Устойчивость динамической пены

| pH раствора | Высота динамической пены | Характеристика пены                                    |
|-------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2,63        | 2-3 мм                   | Неустойчивая пена, разрушается при образовании         |
| 3,18        | 3-4 мм                   | -II-                                                   |
| 4,92        | 4-5 мм                   | -II-                                                   |
| 5,49        | 4,5-5 см                 | Разрушается в объеме                                   |
| 6,62        | 18 см                    | Очень устойчивая, выходит из генератора, не разрушаясь |
| 9           | 5-6 см                   | Разрушается в объеме, дисперсность пузырей 1-2 см      |

Оказалось, что максимум пенообразующей способности желатины лежит в изoeлектрической точке (pH=4,8-4,9). Пена из 0,01 %, 0,02 %, 0,1 % растворов чистой желатины (без добавок ПАВ) неустойчива [1] и быстро разрушается под действием даже малых (1-2 кПа) перепадов давления.

Желатину и ПАВ использовали в соотношении концентраций (мас. %) ( $C_{\text{ж}}$ :  $C_{\text{ПАВ}}$ ), равном 0,28 и 1,74. Устойчивость пены достигала максимального значения при pH=6,62 и отношению желатина : ПАВ, равному 0,28. Устойчивость при указанном значении pH соответствует максимальному снижению межфазной энергии  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ , где  $\sigma_1$  – поверхностное натяжение на границе раздела «раствор-воздух»;  $\sigma_2$  – поверхностное натяжение на границе раздела «водный раствор – дизельное топливо».

Изменение межфазной энергии составило 26,8; 20,9 и 29,8 мН/м при значениях водородного показателя 6; 8 и 7. Высота столба динамической пены даже в присутствии значительного (0,37 %) количества дизельного топлива (ДТ) достигала 17 см. При этом разрушения пены в объеме не наблюдалось.

Повышение водородного показателя до 8 и более (см. таблицу) изменяло свойства пенного слоя. В частности, при pH=9 высота динамической пены не превышала 6 см, в пене образованы полости диаметром 1-2 см.

Дальнейшие исследования были направлены на выбор оптимального состава водного раствора «желатина – ПАВ». К воде, содержащей  $10^{-3}$  моль/л додецилсульфата натрия и желатину (0,008 %), добавляли определенное количество дизельного топлива и определяли его количество на флюорате. В генератор ПОР-40 добавляли 8 мл исследуемой жидкости с концентрацией  $C_{исх}$ , пену (в течение 6-8 минут) собирали в отдельную ячейку. Анализировали нефтепродукты в оставшейся жидкости ( $C_{ост}$ ).

При использовании исходного раствора состава  $10^{-3}$  моль/л DDSNa + 0,008 % желатины наблюдали снижение органического вещества в исходном растворе в 4,8 раза. Соотношение желатина: ПАВ в исходном растворе определяет состав и структуру адсорбционных слоев и влияет на устойчивость дисперсной системы. Ранее отмечалось, что структура, состав и свойства межфазного слоя жидкость – газ меняются при соотношении  $C_{ж}:C_{пав}$ , равном 1,74, то есть в области образования поверхностно-активных комплексов. Поэтому заметное (в 7,9 раза) снижение ДТ наблюдали при использовании раствора состава:  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л DDSNa + 0,1 % желатины. Пены, полученные из раствора указанного состава, мало изменяли свою устойчивость при повышении растворенного дизельного топлива от 100 до 600 мг/л. В частности, время жизни пены, полученной из раствора, содержащего  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л DDSNa + 0,1 % желатины, под действием приложенного перепада давления  $\Delta P = 1$  кПа было равно 12 и 10 минут при концентрациях органической фазы 100 и 600 мг/л.

Таким образом, выделение растворенного дизельного топлива становится эффективным при значениях водородного показателя, близких к нейтральной среде, и соотношении «белок/ПАВ», равным 1,74, то есть в области образования поверхностно-активных комплексов «желатина-ПАВ».

#### Список литературы

1. Vilkova, N.G. Foaming concentration of gelatine from it's solution containing sodium dodecyl sulfate / N.G. Vilkova, T.N. Khaskova, P.M. Kruglyakov // Colloid Journal. – 1995. – V. 57. – №6. – P. 741–744.
2. Вюстнек, Р. Исследование поверхностных свойств адсорбционных слоев желатины с добавками ПАВ на границе раздела фаз воздух-раствор / Р. Вюстнек, Л. Цастров, Г. Кречмар // Коллоидный журнал. – 1985. – Т.37. – №3. – С. 462–470.
3. Измайлова, В.Н. Влияние углеводородных и фтористых поверхностно-активных веществ на свойства желатины в объеме водной фазы и на границе с воздухом / В.Н. Измайлова, С.Р. Деркач, К.В. Зотова, Р.Г. Данилова // Коллоидный журнал. – 1993. – Т.55. – №3. – С. 54–90.
4. Exerowa, D. 1998. Foam and foam films. Theory, experiment, application / D. Exerowa, P.M. Kruglyakov. – Elsevier: Amsterdam. – P.773.
5. Вилкова, Н.Г. Свойства пен и методы их исследования / Н.Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 119.

#### References

1. Vilkova, N.G. Foaming concentration of gelatine from it's solution containing sodium dodecyl sulfate / N.G. Vilkova, T.N. Khaskova, P.M. Kruglyakov // Colloid Journal. – 1995. – V. 57. – №6. – P. 741–744.
2. Vjustec, R. Investigation of the surface adsorption properties of gelatin layers with surfactant additives on the phase boundary, the air-solution / R. Vjustec, L. Castrov, G. Krechmar // Colloidnii jurnal. – 1985. – Т. 37. – № 3. – P. 462–470.
3. Izmailova, V.N. The effect of hydrocarbon and fluorinated surfactants on the properties of gelatin in the volume of the aqueous phase and on the border with air / V.N. Izmailova, S.R. Dercach, K.V. Zotova, R.G. Danilova // Colloidnii jurnal. – 1993. – Т. 55. – № 3. – P. 54–90.
4. Exerowa, D. 1998. Foam and foam films. Theory, experiment, application / D. Exerowa, P.M. Kruglyakov. – Elsevier: Amsterdam. – P.773.
5. Vilkova, N.G. The properties of foams and methods of their research/ N.G. Vilkova. – Penza: PRUAS, 2014. – P. 119.

УДК 519.7

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

**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

**Сухов Ярослав Игоревич**,  
студент  
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

**Sukhov Yaroslav Igorevich**,  
Student  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## ИТЕРАТИВНЫЙ ТЕОРЕТИКО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СИСТЕМ

А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Я.И. Сухов

Предлагается теоретико-экспериментальный метод построения обобщенного функционала качества итеративным способом. Подробно обсуждаются методологические вопросы использования метода наименьших квадратов с учетом количества используемых опытов.

*Ключевые слова:* многоцелевые системы, оценка качества, аддитивный глобальный критерий, зависимость от числа опытов, методы формирования

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ITERATIVE METHOD OF FORMATION THE QUALITY CRITERIA OF MULTI-PURPOSE SYSTEMS

А.М. Danilov, I.A. Garkina, Y.I. Sukhov

Theoretical and experimental method for constructing generalized quality functional by an iterative manner is suggested. Methodological basic usage of the method of least squares (for small number of experiments) are discussed in detail.

*Keywords:* multi-purpose system, quality assessment, additive global criterion, dependent on the number of experiments, methods of formation

Наиболее трудными вопросами синтеза и параметрической идентификации сложных многоцелевых систем [1, 2] являются: определение множества критериев качества, их ранжирование и расстановка приоритетов, определение размерности критериального пространства [3], построение обобщенного критерия качества с предварительной нормализацией частных критериев [4]. Накопленный опыт работы по проектированию сложных систем [4, 5], в том числе эргатических, показывает, что практически невозможно одноэтапно решить указанную совокупность проблем. Уже начиная с этапа когнитивного моделирования [6], просматривается необходимость использования итеративных методов. Исходя из этого, ниже как один из возможных

путей оценки качества сложных систем предлагается теоретико-экспериментальный метод построения функционала качества на основе экспертных оценок (предусматривается несколько итераций).

Построение функционала качества с использованием результатов когнитивного моделирования предполагает наличие практического опыта проектирования сложных систем и, естественно, интуиции. Как правило, используется ряд итераций. На разных итерациях к формированию функционала предъявляются отличающиеся друг от друга требования. Поэтому и задачи перед экспертами на каждом этапе будут различными. Наиболее сложные задачи решаются на первой итерации: информация о работе системы на этом этапе минимальна, а требуется определить не только зависимости, которым подчиняются частные критерии в обобщенном функционале, но и вид, а также количество самих частных критериев. Естественно, решение более сложных задач влечет за собой неточности построения функционала, устранение которых должно проводиться на последующих итерациях. Синтез обобщенного функционала на первой итерации проводится в несколько этапов: определение множества частных критериев, отбор наиболее важных, определение формы объединения частных критериев в обобщенном функционале. После того как будет получен функционал, уже можно строить модель оптимального процесса управления системой.

Далее следует вторая итерация синтеза функционала качества. Сущность ее заключается в том, что экспертам представляется синтезированная на основе полученного функционала модель процесса управления. Эксперты могут ознакомиться с работой оператора в реальной системе в различных режимах и на основе этой информации вводить коррективы в оценку сформированного обобщенного критерия  $K$ . На основе нового критерия определяется новая модель оптимального управления и т.д. Таким образом, *процесс формирования оптимизирующего функционала органически сливается с процессом синтеза оптимального управления оператором*. Перед следующей итерацией уже можно провести статический анализ значимости частных критериев в соответствии с выбранным уровнем значимости, и может быть, добавляя новые частные критерии. При необходимости *возможно изменение формы объединения частных критериев в обобщенном функционале*.

Для эргатических систем характерной особенностью является *вероятностный характер управления: основная причина неадекватности чисто аналитической процедуры исследования*. Во многих случаях получение достоверных результатов позволяет применение теоретико-экспериментального метода: оптимизация качества процесса управления проводится на экспериментальной модели с применением какого-либо из известных методов поиска экстремума (например, аппроксимация функции отклика некоторой приближающей функцией). Часто *аппроксимируется не обобщенный функционал, а сами частные критерии*, из которых он состоит. Зависимость между обобщенным функционалом и частными критериями нередко предполагается известной, в частности, в линейной форме

$$K = \sum_{j=1}^s \alpha_j K_j, \quad \sum_{j=1}^s \alpha_j = 1; \quad K_j = \sum_{v=1}^{m_j} \beta_{jv} K_{jv}, \quad \sum_{v=1}^{m_j} \beta_{jv} = 1, \quad j = \overline{1, s}$$

или

$$K = \sum_{j=1}^s \alpha_j \sum_{v=1}^{m_j} \beta_{jv} K_{jv}.$$

Имея вид приближающих функций частных критериев  $K_j$ , можно определить значение обобщенного функционала в каждой точке пространства критериев. При такой оптимизации системы управления на основе статистического анализа обобщенного функционала можно получить количественную оценку влияния каждого из частных показателей на его величину и сделать вывод о степени значимости этих

показателей. Функция отклика каждого критерия (зависимость критерия от параметров оптимизации  $K_{jv}$ ) аппроксимируется уравнением регрессии

$$K_j = \sum_{v=1}^{m_j} \beta_{jv} K_{jv} + \varepsilon_j,$$

где  $\beta_{jv}$  – коэффициенты регрессии;  $m_j$  – количество параметров оптимизации;  $\varepsilon_j$  – некоторая добавка, учитывающая разность между действительным значением  $K_j$  и его значением, предсказанным уравнением регрессии.

Искомые значения весовых констант в рассматриваемых функционалах определяются как решения системы нормальных уравнений:

$$c_{11}^j b_{j1} + c_{12}^j b_{j2} + \dots + c_{1m_j}^j b_{jm_j} = d_{j1}$$

$$c_{21}^j b_{j1} + c_{22}^j b_{j2} + \dots + c_{2m_j}^j b_{jm_j} = d_{j2}$$

...

$$c_{m_j 1}^j b_{j1} + c_{m_j 2}^j b_{j2} + \dots + c_{m_j m_j}^j b_{jm_j} = d_{jm_j};$$

$$c_{\nu\mu}^j = c_{\mu\nu}^j = \sum_{u=1}^N K_{j\nu}^{(u)} K_{j\mu}^{(u)},$$

$$d_{j\nu} = \sum_{u=1}^N K_{j\nu}^{(u)} K_j^{(u)};$$

$$\nu, \mu = \overline{1, m_j}, \quad j = \overline{1, s}, \quad \sum_{j=1}^s m_j = N,$$

где  $N$  – количество опытов.

С учетом

$$K = F(K_1, K_2, \dots, K_s),$$

$$\hat{K}_j = \sum_{v=1}^{m_j} b_{jv} K_{jv}, \quad j = \overline{1, s},$$

где  $K_j$  – нормализованные безразмерные частные критерии, одним из известных методов уже можно определить оптимальные значения параметров  $K_{jv}$ , при которых обобщенный функционал  $K$  достигает экстремума.

Сделаем ряд замечаний, связанных с определением оценок  $b_{jv}$  методом наименьших квадратов. Функция отклика для каждой точки эксперимента имеет вид

$$K_j^{(u)} = \beta_{j1} K_{j1}^{(u)} + \beta_{j2} K_{j2}^{(u)} + \dots + \beta_{jm_j} K_{jm_j}^{(u)} + \varepsilon_{uj},$$

где  $K_j^{(u)}$  – экспериментальное значение критерия;  $K_{jv}^{(u)}$  – значение параметров оптимизации в этой точке.

В соответствии с МНК  $\beta_{jv}$  выбираются по условию

$$s_j = \sum_{u=1}^N \varepsilon_{uj}^2 = \sum_{u=1}^N \left( K_j^{(u)} - \beta_{j1} K_{j1}^{(u)} - \beta_{j2} K_{j2}^{(u)} - \dots - \beta_{jm_j} K_{jm_j}^{(u)} \right)^2 = \min.$$

По классической методике определяются частные производные по  $\beta_{jv}$ , приравняются нулю, получается система нормальных уравнений, решение которой и даст значений  $b_{jv}$  коэффициентов регрессии. При большом количестве опытов каждое из слагаемых в последнем выражении оказывает незначительное влияние на общую сумму. При уменьшении  $N$  роль каждого из слагаемых возрастает и при ограниченном количестве точек  $N$  становится уже заметной. В связи с этим в  $s_j$  при

каждом из слагаемых вводится коэффициент  $q_u^j$ , характеризующий отклонение в каждой точке экспериментального значения критерия  $K_j^{(u)}$  от его значения, предсказанного уравнением регрессии

$$s_j = \sum_{u=1}^N q_u^j \left( K_j^{(u)} - b_{j1} K_{j1}^{(u)} - b_{j2} K_{j2}^{(u)} - \dots - b_{jm_j} K_{jm_j}^{(u)} \right)^2, \sum_{u=1}^N q_u^j = N, j = \overline{1, s},$$

где  $q_u^j$  – функция от коэффициентов  $b_{jv}$ .

В этом случае система нормальных уравнений примет вид

$$a_{11}^j b_{j1} + a_{12}^j b_{j2} + \dots + a_{1m_j}^j b_{jm_j} = a_1^j$$

$$a_{21}^j b_{j1} + a_{22}^j b_{j2} + \dots + a_{2m_j}^j b_{jm_j} = a_2^j$$

...

$$a_{m_j 1}^j b_{j1} + a_{m_j 2}^j b_{j2} + \dots + a_{m_j m_j}^j b_{jm_j} = a_{m_j}^j;$$

$$a_{\nu\mu}^j = a_{\mu\nu}^j = \sum_{u=1}^N q_u^j K_{j\nu}^{(u)} K_{j\mu}^{(u)}, a_{\nu}^j = \sum_{u=1}^N q_u^j K_j^{(u)} K_{j\nu}^{(u)}; \nu, \mu = \overline{1, m_j}.$$

Непосредственно из предыдущего следует итерационный алгоритм

$$a_{11}^j [l] b_{j1} + a_{12}^j [l] b_{j2} + \dots + a_{1m_j}^j [l] b_{jm_j} = a_1^j [l]$$

$$a_{21}^j [l] b_{j1} + a_{22}^j [l] b_{j2} + \dots + a_{2m_j}^j [l] b_{jm_j} = a_2^j [l]$$

...

$$a_{m_j 1}^j [l] b_{j1} + a_{m_j 2}^j [l] b_{j2} + \dots + a_{m_j m_j}^j [l] b_{jm_j} = a_{m_j}^j [l];$$

$$a_{\nu\mu}^j [l] = a_{\mu\nu}^j [l] = \sum_{u=1}^N q_u^j [l] K_{j\nu}^{(u)} K_{j\mu}^{(u)},$$

$$a_{\nu}^j [l] = \sum_{u=1}^N q_u^j [l] K_j^{(u)} K_{j\nu}^{(u)}; \nu, \mu = \overline{1, m_j};$$

$$q_u^j [l] = \frac{N \exp \left( -\frac{1}{2\sigma_j^2} \left( K_j^{(u)} [l] - \hat{K}_j^{(u)} [l-1] \right)^2 \right)}{\sum_{u=1}^N \exp \left( -\frac{1}{2\sigma_j^2} \left( K_j^{(u)} [l] - \hat{K}_j^{(u)} [l-1] \right)^2 \right)},$$

где  $l$  – номер итерации.

В последних формулах неизвестная дисперсия  $\sigma_j^2$  заменяется ее оценкой

$$s_j^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \left( K_j^{(u)} - \hat{K}_j^{(u)} \right)^2}{N - m_j - 1}.$$

Итерационный процесс завершается при достижении условия

$$\sum_{u=1}^N \left| \hat{K}_j^{(u)} [l] - \hat{K}_j^{(u)} [l-1] \right| < \varepsilon',$$

где  $\varepsilon'$  – заданная малая величина.

В ряде случаев возможно упрощение обобщенного функционала уменьшением размерности критериального пространства. Эффективным для этого оказалось применение регрессионного критерия значимости частных критериев (критерий Фишера) либо метода главных компонент [7].

## Список литературы

1. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 10. – P.441–445. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5276>.
2. Гарькина, И.А. Проблема многокритериальности при управлении качеством сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2 (41). – С. 123–129.
3. Данилов, А.М. Системная модель: выбор размерности критериального пространства / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Московское научное обозрение. – 2012. – № 3. – С. 05–07.
4. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
5. Данилов, А.М. Сложные системы: идентификация, синтез, управление: монография / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 308 с.
6. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4. – С. 30–37.
7. Данилов, А.М. Метод главных компонент: оценка качества покрытий / А.М. Данилов, В.И. Логанина, В.А. Смирнов // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 31–32.

## References

1. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 10. – P.441–445. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5276>.
2. Garkina, I.A. The problem with the multicriteriality quality management of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // World Transport and technological machines. – 2013. – № 2 (41). – P. 123–129.
3. Danilov, A.M. Sistemnaya model: selecting the dimensions of the space criterion / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Moscow scientific review. – 2012. – № 3. – P. 05–07.
4. Bazhenov, Y.M. System analysis in building materials: monograph / Y.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolyov. – M.: MSUCE Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
5. Danilov, A.M. Complex systems: identification, synthesis, management: a monograph / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS, 2011. – 308 p.
6. Garkina, I.A. Kognitivnoe modeling of composite materials in the synthesis of complex systems like / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolyov // News of Higher Schools. Building. – 2009. – № 3–4. – P. 30–37.
7. Danilov, A.M. Metod major compo-nents: assessment of quality of coatings / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Regional architecture and build-ment. – 2009. – № 1. – P. 31–32.



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

**Аверкин Александр Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплогасоснабжение и  
вентиляция»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Родионов Юрий Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор,  
директор автомобильно-дорожного  
института  
E-mail: rodionov@pguas.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г.Пенза, ул.Красная, 40,  
тел.: (841-2) 36-80-10

**Салмин Владимир Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Транспортные машины»  
E-mail: salmin-penza@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

**Averkin Aleksander Grigorievich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heat and Ventilation»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Eremkin Alexander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Heat and ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Rodionov Yuri Vladimirovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Director of  
Automobile Engineering Institute  
E-mail: rodionov@pguas.ru

Penza State University  
Russia, 440026, Penza, Krasnaya, 40,  
tel.: (841-2) 36-80-10

**Salmin Vladimir Vasilievich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
departament «Transport maschiny»  
E-mail: salmin-penza@yandex.ru

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

А.Г.Аверкин, А.И.Еремкин, Ю.В.Родионов, В.В.Салмин

Рассматривается процесс интенсификации конвективного теплообмена за счет уменьшения толщины пограничного ламинарного воздушного слоя в канале прямоугольного сечения воздухо-воздушного теплообменника. Показано, что интенсивность теплообмена воздушного потока повышена в 3–5 раз при установке турбулизаторов в виде гофрированных пластин в каналах теплообменника.

*Ключевые слова:* воздухо-воздушный теплообменник, конвективный теплообмен, прямоугольный канал, турбулизатор

## INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN AIR-TO-AIR HEAT EXCHANGER

A.G. Averkin, A.I. Eremkin, Y.V.Rodionov, V.V.Salmin

Intensification of convective heat transfer by reducing the thickness of the laminar boundary layer of air in the duct of rectangular cross-section air-to-air heat exchanger. Heat transfer rate of the air flow is increased in 3 – 5 times during the installation of turbulence in the form of corrugated plates in the channels of the heat exchanger.

*Keywords:* air-to-air heat exchanger, convective heat transfer, rectangular channel, the vortex

В системах кондиционирования воздуха (СКВ) большое распространение получили пластинчатые воздухо-воздушные теплообменники, в частности, их применяют в качестве рекуперативных теплоутилизаторов [1].

Конвективный теплообмен между воздухом и стенкой характеризуется относительно низкими значениями коэффициента теплоотдачи, что отражается на общем

коэффициенте теплообмена: коэффициент теплопередачи в воздушных потоках при вынужденной конвекции равен  $10 \dots 40 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ .

Повышение численной величины коэффициента теплопередачи способствует снижению поверхности теплопередачи, т.е. при равной тепловой нагрузке приводит к уменьшению линейных размеров теплообменника (соответственно, снижаются его металлоемкость, стоимость, требуется меньшая производственная площадь для его монтажа). Таким образом, интенсификация конвективного теплообмена на границе воздух – плоская металлическая стенка является актуальной проблемой энерго- и ресурсосбережения.

Эффективным методом интенсификации теплоотдачи является создание в пристенной области канала отрывных зон, воздействующих на ее структуру.

По Дрейцеру Г.А. [2], наилучшие результаты получены при дискретной турбулизации потока на стенках канала, где источником турбулентных вихрей служат плавные очерченные выступы или канавки. Их рекомендуется располагать слишком часто ( $t/h \leq 5 \dots 10$ , где  $t$  – шаг,  $h$  – высота турбулизатора). Возникающие при этом за турбулизатором пульсации не успевают заметно затухнуть на пути к следующему турбулизатору и будут диффундировать в ядро, увеличивая тем самым интенсивность пульсаций. Турбулентные пульсации переносятся основным потоком близко к стенке, повышая коэффициент турбулентной теплопроводности, который оказывает наибольшее влияние на увеличение коэффициента теплоотдачи.

При большем расстоянии между турбулизаторами ( $t/h \geq 50 \dots 100$ ) дополнительная турбулентность успевает заметно затухнуть на некотором расстоянии от турбулизатора и остальной участок канала до следующего турбулизатора по структуре потока будет мало отличаться от гладкого потока.

Максимальное увеличение теплоотдачи  $Nu/Nu_{г\lambda}$  и гидравлического сопротивления  $\zeta/\zeta_{г\lambda}$  канала достигается при  $t/h = 10$ , причем максимум  $Nu/Nu_{г\lambda}$  не зависит от формы турбулизатора, а максимум  $\zeta/\zeta_{г\lambda}$  сильно зависит, он минимален при плавной форме турбулизатора (здесь  $Nu$ ,  $Nu_{г\lambda}$  – критерий Нуссельта для канала с турбулизаторами и для гладкого канала,  $\zeta$ ,  $\zeta_{г\lambda}$  – коэффициенты гидравлического сопротивления канала с турбулизаторами и гладкого канала, соответственно). На этом основании разработан рациональный метод интенсификации теплообмена. В частности, для трубчатых теплообменников предложено наносить накаткой периодически расположенные кольцевые канавки, которые на внутренней поверхности труб образуют кольцевые диафрагмы с плавной конфигурацией. Диафрагмы и кольцевые канавки турбулизируют поток в пристенном слое и обеспечивают интенсификацию теплообмена как снаружи, так и внутри труб. Также обнаружено, что в определенном диапазоне (область с  $Nu/Nu_{г\lambda} = 1,4 \dots 1,5$  при относительном шаге размещения труб в пучке  $s/D_n = 1,2$ , где  $s$  – шаг, мм;  $D_n$  – наружный диаметр трубы, мм) соответствующих размеров и расположений турбулизаторов рост теплоотдачи больше роста гидравлического сопротивления по сравнению с аналогичным гладким каналом.

Данный способ интенсификации теплообмена путем искусственной турбулизации воздушного потока нами апробирован в прямоугольных каналах пластинчатого теплообменника.

Исследуемый теплообменник является узлом экспериментального стенда – компактной градирни, разработанной и смонтированной на кафедре «Теплогасоснабжение и вентиляция» [1, 3]. Схема градирни представлена на рис.1.

Градирня позволяет охлаждать воду до температуры ниже, чем температура мокрого термометра окружающего воздуха. Повышенная охлаждающая мощность градирни создается за счет применения многоступенчатых циклов, состоящих из стадий косвенного и прямого охлаждения рабочих сред: воздуха и воды [4]. Воздухо-воздушный теплообменник 5 служит для охлаждения наружного воздуха (Н) воздушным увлажненным потоком (У), удаляемого из насадочной части 2 градирни. Чем меньше температура (по сухому, мокрому термометру) охлажденного наружного воздуха после теплообменника 5, тем интенсивнее осуществляется прямое испарительное охлаждение воды в насадке 2, тем ниже ее температура.

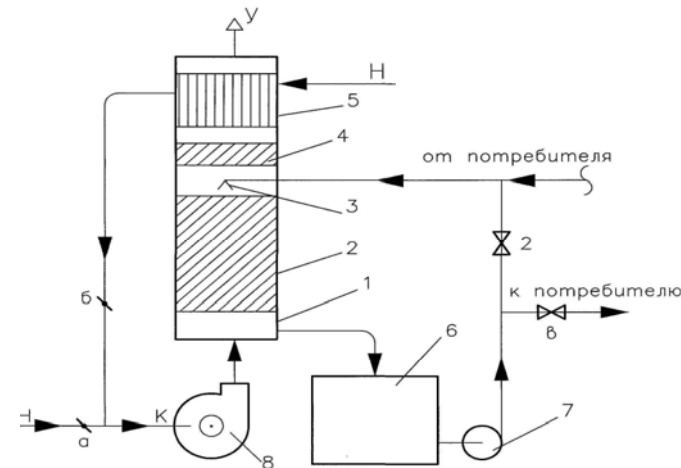


Рис. 1. Схема градирни:

1 – корпус; 2 – насадка; 3 – распылитель; 4 – каплеуловитель; 5 – воздухо-воздушный теплообменник; 6 – бак для воды; 7 – насос; 8 – вентилятор;  
а, б – шиберные задвижки; в, г – вентили

Таким образом, в первую очередь от эффективности конвективного теплообмена в воздухо-воздушном теплообменнике 5 зависит интенсивность охлаждения воды в компактной градирне. Анализ факторов, влияющих на теплопередачу в теплообменнике, показал, что лимитирующей величиной является коэффициент теплоотдачи на границе наружный воздух – плоская стенка, его и необходимо повысить.

Интенсификация конвективного теплообмена осуществлялась путем установки разработанных турбулизаторов в прямоугольные каналы теплообменника 5. Это позволяло уменьшить (за счет разрушения) толщину пограничного ламинарного воздушного слоя на стенке канала.

Турбулизаторы представляли собой гофрированные пластины, выполненные из листовой оцинкованной стали (рис.2).

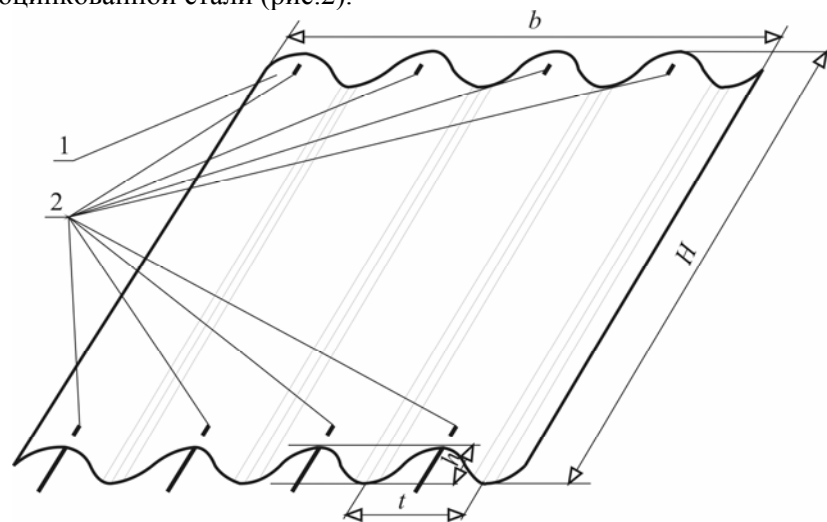


Рис.2. Турбулизатор:

1 – корпус (гофрированная пластина); 2 – центраторы

Крепление пластин в каналах теплообменника осуществлялось специальными центраторами, они же обеспечивали осевое расположение пластин в каналах. Длина центратора соответствовала ширине канала. В турбулизаторе принято соотношение  $t/h \leq 5$ . Линейные размеры сечения канала равнялись  $(20 \times 500(H))$  мм, глубина канала  $b = 400$  мм.

Экспериментальные исследования проводились с использованием математического метода планирования эксперимента [5].

На основе априорной информации приняты независимые переменные (факторы):  $X_1$  – расход воздуха (160...260), м<sup>3</sup>/ч;  $X_2$  – плотность орошения (0,6...1,4), м<sup>3</sup>/(ч м<sup>2</sup>);  $X_3$  – продолжительность охлаждения воды (10...30), мин. В качестве функции отклика выбрана:  $Y$  – потеря давления в теплообменнике, Па. Также определялись коэффициент теплоотдачи на границе наружный воздух – стенка канала и разность температуры воды и мокрого термометра воздуха, °С;

Был реализован полный факторный эксперимент ПФЭ 2<sup>3</sup>.

Матрица планирования экспериментов приведена в таблице.

Матрица планирования и реализации экспериментов ПФЭ 2<sup>3</sup>

| Номер опыта | Факторы |       |       | Функция отклика           |
|-------------|---------|-------|-------|---------------------------|
|             | $X_1$   | $X_2$ | $X_3$ | $Y (\Delta P, \text{Па})$ |
| 1           | +       | +     | +     | 58                        |
| 2           | –       | +     | +     | 19                        |
| 3           | +       | –     | +     | 58                        |
| 4           | –       | –     | +     | 19                        |
| 5           | +       | +     | –     | 58                        |
| 6           | –       | +     | –     | 19                        |
| 7           | +       | –     | –     | 58                        |
| 8           | –       | –     | –     | 19                        |

Конвективный теплообмен в каналах теплообменника оценивали по критерию Нуссельта (при отсутствии турбулизаторов –  $Nu_{\text{гл}}$ , при наличии турбулизаторов в каналах –  $Nu$ ) [6]:

– при ламинарном режиме

$$Nu = 1,4 \left( Re \frac{d_3}{l} \right)^{0,4} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}, \quad (1)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$ ,  $Pr_{\text{ст}}$  – соответственно, критерии Прандтля для воздушного потока, рассчитанные по температуре потока и температуре стенки канала;  $d_3$  – эквивалентный диаметр канала, м;  $l$  – определяющий линейный размер канала, м;

– при переходном режиме

$$Nu / Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} = f(Re); \quad (2)$$

– при турбулентном режиме

$$Nu = 0,021 Re^{0,80} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \epsilon_l, \quad (3)$$

где  $\epsilon_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от длины канала.

Численное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  определялось с применением уравнения Ньютона – Рихмана

$$Q = \alpha(t - t_{\text{ст}})F, \quad (4)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $t$ ,  $t_{\text{ст}}$  – соответственно, температура воздуха и стенки, °С;  $F$  – площадь поверхности канала, м<sup>2</sup>.

Температуры стенок канала, воздушного потока определялись термометрическим способом [1]. Применялись хромель-копелевые термопары (ХК) в комплекте с электронно-вычислительными приборами марок Щ-300, ИТ-1. Крепление термопар к стенкам теплообменного аппарата осуществлялось с помощью эпоксидного клея.

По результатам обработки экспериментальных данных составлена сравнительная характеристика интенсификации конвективного теплообмена за счет установки пластин – турбулизаторов – в каналах теплообменника (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что в проведенной серии экспериментов, за счет установки турбулизаторов в виде гофрированных пластин в прямоугольных каналах теплообменника, рост конвективного теплообмена составил от 3 до 5 ( $Nu/Nu_{гл} = 3,1 \dots 5$ ). При этом сопротивление каналов увеличивалось от 4...8 Па для гладких каналов ( $\Delta P_{гл}$ ) до 19...58 Па в каналах с турбулизаторами (повышение составляло от 4,9 до 7,3 раза).

Во всех опытах температура воды, охлажденной в градирне, была ниже температуры мокрого термометра наружного воздуха на 2...5 °С.

Интенсификация теплообмена в воздушно-воздушном теплообменнике эффективно реализована при осевой установке гофрированных пластин – турбулизаторов – в прямоугольных каналах теплообменника.

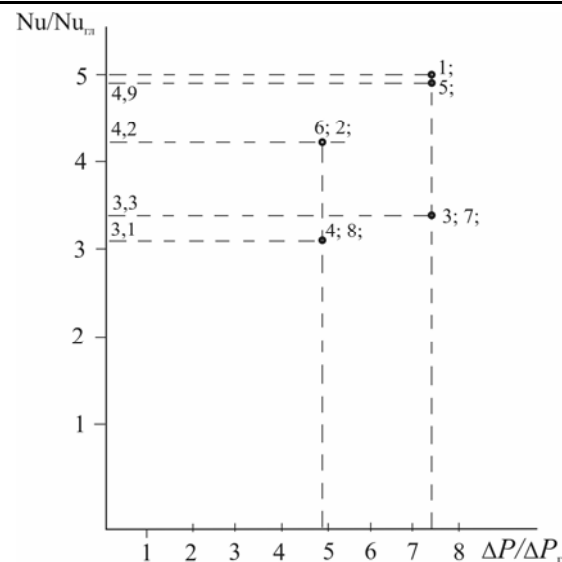


Рис. 3. Интенсификация конвективного теплообмена за счет установки турбулизаторов в каналах теплообменника: точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответствуют номерам опытов при реализации ПФЭ  $2^3$

#### Список литературы

1. Аверкин, А.Г. Тепловлажностная обработка воздуха в системах вентиляции и кондиционирования / А.Г. Аверкин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 188 с.
2. Гортышов, Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов [и др.]. – Казань: Центр инновационных технологий, 2008. – 531 с.
3. Патент РФ 2274813. Устройство для охлаждения воды / А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин, К.В. Миронов, О.В. Родионов; Оpubл. Б.И. № 11, 2006.
4. Патент РФ 2243451. Способ охлаждения воздушного потока / А.Г. Аверкин; опубл. Б.И. №36, 2004.
5. Беккер, В.Ф. Моделирование химико-технологических объектов управления / В.Ф. Беккер. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 142 с.
6. Поникаров, И.И. Расчеты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки. Примеры и задачи / И.И. Поникаров. – М.: Альфа-М, 2008. – 720 с.

#### References

1. Averkin, A.G. Heat and humidity treatment of air in ventilation systems and air-conditioning / A.G. Averkin. – Penza: PGUAS, 2011. – 188 p.
2. Gortyshov, Y.F. Thermal-hydraulic efficiency perspective ways of intensification of heat transfer in heat exchanger channels of equipment / Y.F. Gortyshov [et al.]. – Kasan: Innovation Center, 2008. – 531 p.
3. RF patent 2274813. Device for cooling water / A.G. Averkin, A.I. Eremkin, K.V. Mironov, O.V. Rodionov; Opubl. B.I. № 11, 2006.
4. RF patent 2243451. A method of cooling airflow / A.G. Averkin, Opubl. B.I. №36, 2004.
5. Bekker, V.F. Modeling of chemical – engineering systems / V.F. Bekker. – M.: RIOR: INFRA-M, 2014. – 142 p.
6. Ponikarov, I.I. Calculations of machines and devices of chemical manufactures, and oil refining. Examples and tasks / I.I. Ponikarov. – M: Alpha-M, 2008. – 720 p.

УДК 697.911

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

**Баканова Светлана Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогазоснабжение и  
вентиляция»  
E-mail SvBakanova@mail.ru

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
советник при ректоре, зав. кафедрой  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»  
E-mail eremkin@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

**Bakanova Svetlana Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
department of «Heatgas supply and  
ventilation»  
E-mail SvBakanova@mail.ru

**Eremkin Alexander Ivanovich**,  
Doctor of Science, Professor, Head of the  
department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail eremkin@pguas.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ

С.В. Баканова, А.И. Еремкин

Изложена методика оценки эффективности воздухораспределения в помещениях при хранении скоропортящейся продукции. Параметры воздушной среды рассматриваются как случайные величины. При изучении вентиляционных процессов используются статистические законы их распределения. Расчет воздухообмена предложено вести по предельно допустимому состоянию температуры в штабеле хранимой продукции.

*Ключевые слова: воздухораспределение, хранение скоропортящейся продукции, структура пористого слоя, предельно-вероятностный метод*

## METHOD OF ASSESSMENT OF EFFECIENCY AND DEFINITION OF AIR DISTRIBUTION IN STORAGE ROOMS OF PERISHABLE PRODUCTS

S.V. Bakanova, A.I. Eremkin

Methods of assessment of the efficiency of air distribution in storage rooms of perishable products are given. Air parameters are treated as random variables. In the study of the ventilation processes static laws of their distribution. Calculation of air discription is suggesred to give the maximum permissible temperature in the pile of stored products are used.

*Keywords: air distribution, storage of perishable products, the structure of the porous layer, maximum-probability method*

Состояние микроклимата любого помещения характеризуется не только средними значениями физико-химических параметров воздушной среды, но и распределением их в рассматриваемом объеме.

В загруженных помещениях беспорядочность форм и размеров поровых каналов, находящихся в штабеле и насыпи хранимой продукции, приводит к тому, что вектор локальной скорости воздушного потока существенно меняет свою величину и направление даже в близлежащих точках потока. Наблюдается неравномерное распределение параметров воздушной среды как в продольном, так и в поперечном направлении. Искусственное вентилирование усугубляет это явление, вследствие чего возни-

кают структурные образования и значительная контрастность полей физических параметров воздушной среды.

Общим свойством таких структурных образований является их стохастическая природа. В этом случае параметры воздушной среды можно рассматривать как случайные величины, а при изучении вентиляционных процессов использовать статистические законы их распределения. Поэтому применение методики учета реально существующей неравномерности эмпирического распределения (например, температур) при сопоставлении вариантов воздухораспределения и расчетах воздухообменов представляется целесообразным, поскольку расширяет возможности анализа и обобщения результатов экспериментов.

Эффективность систем воздухораспределения при хранении скоропортящейся продукции оценивают, как правило, по превышению температуры воздуха на выходе из штабеля ( $\Delta t_{шт}^{yx} = t_{шт}^{yx} - t^{np}$ ) и сравнивают ее с нормируемой величиной ( $\Delta t_{шт}^H = t_{шт}^H - t^{np}$ ) из условия, что  $\Delta t_{шт}^{yx} \leq \Delta t_{шт}^H$ .

Расход воздуха, который следует подавать в загруженное помещение, определяют из условия поддержания в слое хранимой продукции нормируемого перепада температур  $G = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta t_{шт}^H}$ .

Для расчета требуемого объема вентиляционного воздуха и сопоставления различных систем воздухораспределения применительно к помещениям промышленных зданий, в отличие от загруженных помещений, используют температурный симплекс

$$m_{\Delta t} = \frac{t_{p.з} - t^{np}}{t^{yx} - t^{np}} \text{ или величину}$$

$$\frac{1}{m_{\Delta t}} = K_3, \\ G = \frac{m_{\Delta t} \cdot Q}{C_p \cdot \Delta t_{шт}^H}.$$

На основе опытных данных установлено, что величина  $m_{\Delta t}$  зависит от многих факторов: расхода воздуха и схемы организации воздухообмена, тепловой мощности и размеров источников тепла, высоты помещения, количеств конвективного и лучистого тепла и т.д. Однако большинство известных работ по нахождению величины  $m_{\Delta t}(K_3)$  все же носит сугубо экспериментальный характер, и полученные результаты применены лишь для частных случаев.

Считалось, что нужно стремиться к увеличению коэффициента организации воздухообмена, поскольку, чем больше величина  $K_3$ , тем меньше необходимый воздухообмен, тем рациональнее используется приточный воздух. Влияние же коэффициента  $K_3$  на систему воздухораспределения в целом не учитывалось. Однако величина коэффициента  $K_3(m_{\Delta t})$  влияет не только на воздухообмен, но и на потребление теплоты, холода. Следует отметить также, что по величине  $K_3(m_{\Delta t})$  нельзя строго судить о качестве организации воздухообмена, поскольку не учитывается неравномерность поля распределения исследуемого параметра.

На величины  $\Delta t$  и  $m_{\Delta t}$  влияют случайные факторы. Учитывая это, в дальнейшем условимся считать, что  $m_{\Delta t}$  является температурным симплексом, связывающим среднюю избыточную температуру воздуха в штабеле продукции и среднюю избыточную температуру воздуха, уходящего из помещения. Таким образом, для рассматриваемого случая будем иметь:

$$m_{\Delta t} = \frac{t_{шт}^{cp} - t^{np}}{t^{yx} - t^{np}}.$$

При хранении мороженой продукции в упакованном виде основным параметром, определяющим сохранность, является температура внутриштабельного воздуха. Поэтому в данном случае необходимо выявить характер распределения таковой в массе продукции. Такое статистическое изучение позволит отразить не только физическую сторону явлений – средний уровень и структурный масштаб образований в ограниченном объеме, но и результирующий эффект инженерных мероприятий – качество организации воздухообмена.

Как известно, для оценки случайного распределения какого-либо параметра «X» в технике наиболее часто используют:

- математическое ожидание, или среднее значение параметра «X»;
- размах варьирования  $R_x$ ;
- дисперсию (рассеивание) выборочных значений вокруг средней  $\sigma_x^2$ ;
- среднее квадратичное отклонение  $\sigma_x$ ;
- коэффициент вариации, или относительный показатель отклонения  $v_x$ .

Приступая к анализу процессов фильтрации внутриштабельного воздуха в слое хранимой продукции, которые до этого не подвергались всесторонней статистической оценке, целесообразно ее продолжить с помощью критерия  $\chi^2$ , который эффективен для оценки расхождения между эмпирическим и нормальным (теоретическим) распределением. Если ранжированный эмпирический ряд  $X_i$  разбить на несколько интервалов  $S$ , равных протяженности  $\Delta X$ , и оценить два параметра ( $x^{cp}$  и  $\sigma_x$ ), то число степеней свободы для нахождения табличного (критического) значения  $\chi^2$  равно:  $K = S - 1 - 2 = S - 3$ . При этом уровень значимости обычно принимается  $\alpha \geq 0,05$ . Нулевую гипотезу можно принять в случае, если наблюдаемая (эмпирическая) величина  $\chi_{набл}^2$  будет меньше табличной  $\chi_{табл}^2$  при данных  $K$  и  $\alpha$ :

$$\chi_{набл}^2 < \chi_{табл}^2(\alpha, K).$$

После проверки гипотезы о нормальном законе распределения параметров воздуха в вентилируемом объеме уже допустим переход к вероятностному анализу в первую очередь полей температур в штабеле хранимой продукции. Для этого представим распределение параметра «X» в штабеле продукции графически (см. рисунок) в виде ранжированного ряда [1]. По оси  $X$  отмечены граничные, нормируемое и среднее значения:  $X_{шт}^{max}$ ,  $X_{шт}^{min}$ ,  $X_{шт}^H$  и  $X_{шт}^{cp}$ , а также параметры приточного и уходящего воздуха  $x^{np}$  и  $x^{yx}$ . Превышение параметра над заданным уровнем в штабеле продукции обозначено  $\delta$ , приточного воздуха –  $\Delta$ .

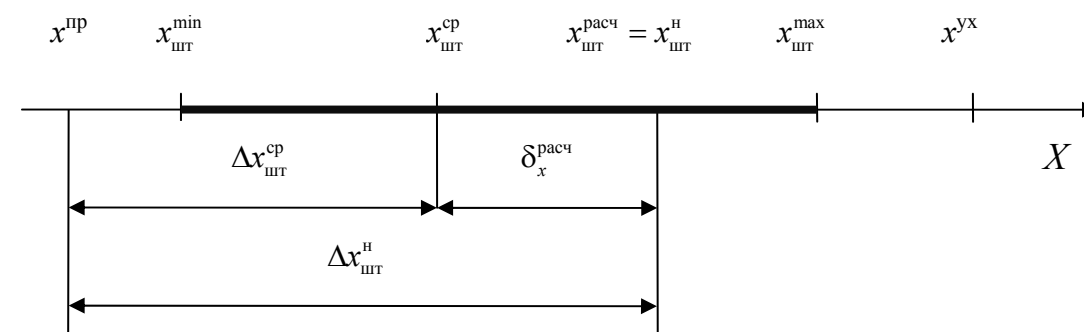


Схема распределения параметра «X» в штабеле продукции и на границах вентилируемого объема

Если нормирование параметра ограничено только верхним пределом ( $x_{шт.i} \leq x_{шт}^H$ ), как это имеет место по температуре при хранении мороженой рыбопродукции, то его расчетное значение, равное  $x_{шт}^H$ , должно быть как можно ближе к  $x_{шт}^{\max}$ . При этом достижение условия  $x_{шт}^{\max} = x_{шт}^H$  является практически трудновыполнимым, да и нецелесообразным, так как вероятность появления больших отклонений  $x_i$  от  $x^{cp}$  достаточно мала и  $x_{шт}^{\max}$  представляет собой максимальную из измеренных, а не существующих в действительности величин. Более реально считать:

$$x_{шт}^{cp} < x_{шт}^{расч} = x_{шт}^H < x_{шт}^{\max}$$

Это соотношение является исходной методологической основой предельно-вероятностного метода расчета воздухообмена в отличие от распространенного решения, при котором  $x_{шт}^{расч} = x_{шт}^{cp}$ . Величину отклонения  $x_{шт}^{расч}$  от  $x_{шт}^{cp} - \delta x^{расч}$  определяют с помощью показателей неравномерности поля ( $\sigma_x$ ) и нормированного аргумента  $\chi$ . Последний определяется из нормального закона его распределения с учетом, что  $\delta x^{расч} = \chi \times \sigma_x$ :

$$\chi = \frac{x_{шт.i} - x_{шт}^{cp}}{\sigma}$$

Вероятность того, что численное значение параметра «X» окажется выше заданного предела ( $x^H$ ), оценивается с помощью функции Лапласа:

$$P(x > x^H) = 0,5 - \Phi(\chi), \quad (1)$$

$$\Phi(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\chi} e^{-x^2/2} dx.$$

Очевидно, что  $\Phi(-\chi) = -\Phi(\chi)$ ; при  $\chi=0$   $\Phi(\chi)=0$ , при  $\chi=5$   $\Phi(\chi) \approx 0,5$ . При допустимых отклонениях эмпирического распределения от нормального для его описания также может быть использована функция Лапласа с заменой нормируемого аргумента  $\chi = \delta x / \sigma_x$  на аргумент  $z = f(x)$ .

Превышение параметра «X» в штабеле продукции по сравнению с его нормируемой величиной ( $x_{шт}^H$ ) можно задать определенной вероятностью  $P(x_{шт.i} > x_{шт}^H) \leq P^*$  и с помощью эмпирического распределения установить соответствующие ему значения нормированного аргумента  $\chi^*$ . Из рисунка видно, что  $x_{шт}^H = x_{шт}^{cp} + \delta x^{расч}$ .

Имея в виду, что  $\delta x^{расч} = \chi^* \cdot \sigma_x$ , получаем:

$$x_{шт}^H = x_{шт}^{cp} + \chi^* \cdot \sigma_x. \quad (2)$$

При этом учитывается как неравномерность (по объему штабеля), так и вероятностный закон распределения интересующего нас параметра.

Вычтем из левой и правой частей уравнения (2) величину  $x^{np}$ , тогда

$$\Delta x_{шт}^H = \Delta x_{шт}^{cp} (1 + \chi^* \cdot \sigma_x / \Delta x_{шт}^{cp}). \quad (3)$$

В уравнении (3) отношение среднего квадратичного отклонения случайного параметра «X» к его среднему избыточному есть «вентиляционный коэффициент вариации»:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\Delta x_{шт}^{cp}}.$$

В соответствии с изложенным можно перейти к методике обоснованного определения расчетного воздухообмена при хранении скоропортящейся продукции с учетом реальной неравномерности поля температур в штабеле продукции.

Средняя избыточная температура  $\Delta t_{шт}^{cp}$  может быть выражена через  $\Delta t^{yx}$  и симплекс  $m_{\Delta t}$ :

$$\Delta t_{шт}^{cp} = m_{\Delta t} \cdot \Delta t^{yx}. \quad (4)$$

С другой стороны, с учетом (3)

$$\Delta t_{шт}^{cp} = \frac{\Delta t_{шт}^H}{1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t}}. \quad (5)$$

Решив совместно (4) и (5) относительно  $\Delta t^{yx}$ , получим:

$$\Delta t^{yx} = \frac{\Delta t_{шт}^H}{m_{\Delta t} (1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_x)}. \quad (6)$$

Величина  $\Delta t^{yx}$  вычисляется из уравнения теплового баланса:

$$\Delta t^{yx} = \frac{Q}{G \cdot C_p}. \quad (7)$$

Тогда из (6) и (7) расчетный воздухообмен равен:

$$G = \frac{m_{\Delta t} \cdot Q (1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t})}{C_p \cdot \Delta t_{шт}^H}. \quad (8)$$

Таким образом, расчет воздухообмена по предельно допустимому состоянию температуры в штабеле мороженой продукции гарантирует с заданной надежностью  $\chi^*$ , что  $t_{шт} \leq t_{шт}^H$ . Анализируя уравнение (8), нетрудно заметить, что при учете неравномерностей поля температур воздухообмен, определяемый при условии, что  $\Delta t_{шт}^{cp} < \Delta t^H < \Delta t_{шт}^{\max}$ , оказывается больше, чем при условии  $\Delta t_{шт}^H = \Delta t_{шт}^{cp}$ .

В качестве характеристики системы воздухораспределения было введено понятие показателя ее эффективности:

$$K_{эф} = \frac{1}{m_{\Delta t} (1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t})}.$$

Можно считать, что показатель эффективности включает в себя характеристику надежности  $(1 - P^*(x_{шт.i} > x_{шт}^H))$ , поскольку  $\chi^*$  соответствует определенной вероятности превышения  $x_{шт.i}$  над  $x_{шт}^H$ . При этом величина  $1 / (1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t})$  является показателем качества:

$$K_{кач} = \frac{1}{1 + \chi^* \cdot \bar{\sigma}_{\Delta t}} \leq 1.$$

Последнее обусловлено тем, что качество и эффективность должны быть взаимосвязаны:

$$K_{эф} = \frac{K_{кач}}{m_{\Delta t}}.$$



Для сопоставления вариантных решений воздухораспределения при заданных гарантиях расчета  $K_{эф}$  и  $K_{кач}$  могут быть использованы в качестве объективных показателей. По своему физическому содержанию они отражают степень несовершенства реального способа организации воздухораспределения по сравнению с «идеальным».

#### Список литературы

1. Успенская, Л.Б. Математическая статистика в вентиляционной технике / Л.Б. Успенская. – М.: Стройиздат, 1980. – 107 с.
2. Баканова, С.В. Предельно-вероятностный метод оценки микроклимата в помещениях хранения скоропортящейся продукции / С.В.Баканова, В.А.Кубис // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С.132–137.
3. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: моногр. / В.И.Бодров, М.В.Бодров, Е.Г.Ионычев, М.Н.Кучеренко; под общ. ред. В.И.Бодрова. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2008. – 623 с.

#### References

1. Uspenskaya, L.B. Mathematical Statistics in ventilation technology / L.B. Uspenskaya. – M.: Stroiizdat, 1980. – 107 p.
2. Bakanova, S.V. Ultimately probabilistic method for estimating indoor climate storage of perishable products / S.V.Bakanova, V.A.Kubis // Regional architecture and engineering. – 2013. – №1. – P.132–137.
3. Climate of agricultural production buildings and facilities: monograph. / V.I.Bodrov, M.V.Bodrov, E.G.Ionychev, M.N.Kucherenko; under the total. Ed. V.I.Bodrova. – Nizhni Novgorod: NNGASU, 2008. – 623 p.

# АРХИТЕКТУРА ARCHITECTURE

УДК 711.4:69.007:331.363

Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет  
Россия, 190005, Санкт-Петербург,  
ул. 2-ая Красноармейская, д.4  
**Шестернева Наталья Николаевна**,  
кандидат архитектуры, доцент кафедры  
«Городское хозяйство, землеустройство  
и кадастры»  
E-mail: shesternevan@gmail.com

St. Petersburg State University of Architecture  
and Civil Engineering  
Russia, 190005, Petersburg, 4,  
2-nd Krasnoarmeiskaya St.  
**Shesterneva Natalia Nikolaevna**,  
Candidat of Architecture, Associate Professor  
of the department «The urban economy, land  
management and cadastre»  
E-mail: shesternevan@gmail.com

## РОССИЙСКИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ШКОЛЫ В XXI ВЕКЕ

Н.Н. Шестернева

Система градостроительного образования рассмотрена и определена самостоятельным (отдельным от архитектуры и инженерных наук) объектом изучения. Выполнен комплексный анализ российской системы подготовки градостроительных кадров с учетом специфики функционирования отдельных региональных школ, приведены качественные и количественные характеристики рассматриваемой системы.

*Ключевые слова: градостроительное образование, градостроительная школа, профессия «градостроитель», градоведение*

## RUSSIAN URBAN PLANNING SCHOOLS IN THE XXI CENTURY

N.N. Shesterneva

The article considers the urban planning education system, which is described as an independent of architectural and engineering education. The author has performed a comprehensive analysis of urban Russian schools of regional educational institutions. The article presents qualitative and quantitative characteristics of the educational system of urban planners.

*Keywords: urban planning education, urban planning school, profession «urban planner», urban planning*

Российская система профессиональной подготовки градостроительных кадров представляет собой объект, часто подвергающийся сегодня всесторонней критике, но малоизученный и совершенно не описанный с позиций его географических, структурно-пространственных и понятийно-терминологических характеристик. Отсутствие понимания природы феномена «градостроительного образования» (традиционно воспринимаемого как часть архитектурного, реже – инженерного, образования), его предметно-профессиональных границ и следующее из этого непонимание разрозненное и несогласованное функционирование действующих на территории России градостроительных школ приводит к губительным последствиям для всей отрасли. Многочисленные дискуссии в подавляющем большинстве касаются только столичных учебных заведений, фактически не затрагивая специфики региональных градостроительных школ.

В связи с этим чрезвычайно актуальной представляется проблема комплексного системного изучения всего многообразия учебных заведений, составляющих основу российской системы профессиональной подготовки градостроительных кадров. При этом совершенно очевидна недостаточность сугубо педагогических исследований обозначенного круга вопросов, требуется восстановление традиций всестороннего участия профессионального сообщества в обсуждении кадровых проблем отрасли. Цель данной статьи состоит в создании адекватного информационного поля в отношении всей системы градостроительного образования России, в рамках которого в дальнейшем смогут быть проведены более подробные исследования и сформулированы принципы развития как всей системы в целом, так и ее отдельных компонентов. Круг задач определен исходя из намеченной цели: уточнение структурных и территориальных границ в отношении объекта исследования – системы градостроительного образования, выявление особенностей функционирования компонентов, ее формирующих, их количественных и качественных характеристик.

Во всем мире деятельность, направленная на развитие территорий (и ее частный и наиболее распространенный подвид – деятельность по застройке и развитию городских территорий) имеет узконаправленную региональную специфику, которая усугубляется конкретными социально-политическими и экономическими условиями. Отсюда и терминологическое многообразие («градостроительство», «urban planning», «urbanisme», «Städtebau»), принципиально несопоставимое между собой, и богатство применяемых в системах подготовки кадров моделей обучения [1]. Российская система, являющаяся преемницей советской и в то же время функционирующая в постиндустриальных реалиях современного общества, обрела свои черты под воздействием следующих обстоятельств:

- Изначально (1880-1920 гг.) зародившаяся под сильным влиянием европейской градостроительной мысли [2] в период 1930-1990 гг. развивалась изолированно, благодаря чему сформировалось несколько сильных самобытных научно-исследовательских направлений; в постсоветский период под влиянием западноевропейской и американской градостроительных школ, более соответствующих реалиям рынка труда, частично утратила независимые исследовательские традиции.

- В период 1950-1990 гг. благодаря экономикогеографической и политической обстановке оказала значительное влияние на градостроительные школы стран так называемого «соцлагеря» (Болгария, Польша, Чехословакия, Венгрия [3]), а также стран, входивших в состав СССР (Белоруссия, Украина, Молдова, Казахстан и др.); в пост-советский период это влияние было частично утрачено.

- Обозначившиеся еще на этапе зарождения специальности «градостроительство» несколько направлений профессиональной подготовки («планировочное», «инженерное», «коммунально-хозяйственное и экономическое»), получили в дальнейшем свое самостоятельное развитие в виде отдельных квалификаций («архитектор», «инженер по специальности «городское строительство», инженер по специальности «городской кадастр» и др.), никак организационно не связанных между собой.

- В методическом плане специфический выбор преподаваемых дисциплин и развиваемых исследовательских направлений был строго обусловлен особенностями социально-политической обстановки: на фоне отсутствия необходимости решать вопросы правового и землеустроительного порядка [4], находясь вне зоны влияния на стратегические экономические и социальные показатели (которые «спускались» уже в готовом виде «задания на проектирование»), советская – а по инерции и российская система градостроительного образования – были нацелены на развитие расчетно-оформительских, эстетико-планировочных и средо-формирующих навыков.

Помимо глобальных обстоятельств, на современное положение российских градостроительных школ оказывали влияние территориально-географические и организационно-методические условия работы объектов, непосредственно составляющих основу образовательной системы (рис. 1):

- На этапе выделения градостроительства как самостоятельного вида деятельности (1880-1920 гг.) учебные курсы, осуществлявшие подготовку в этой области, в

основном создавались на базе существующих инженерных учебных заведений, разрозненно функционирующих в крупных городах страны; с постепенным переходом (1920-1940 гг.) этих функций к архитектурным учебным заведениям.

- Период 1950-1990 гг. сопровождался постепенной централизацией организационно-методических функций руководства специальностями градостроительного профиля в столичных вузах, что способствовало активизации в 1990-2010 гг. процесса совместного «кластерного» развития по принципу общности региональных условий и – при необходимости – единства материально-технической базы (рис. 1).

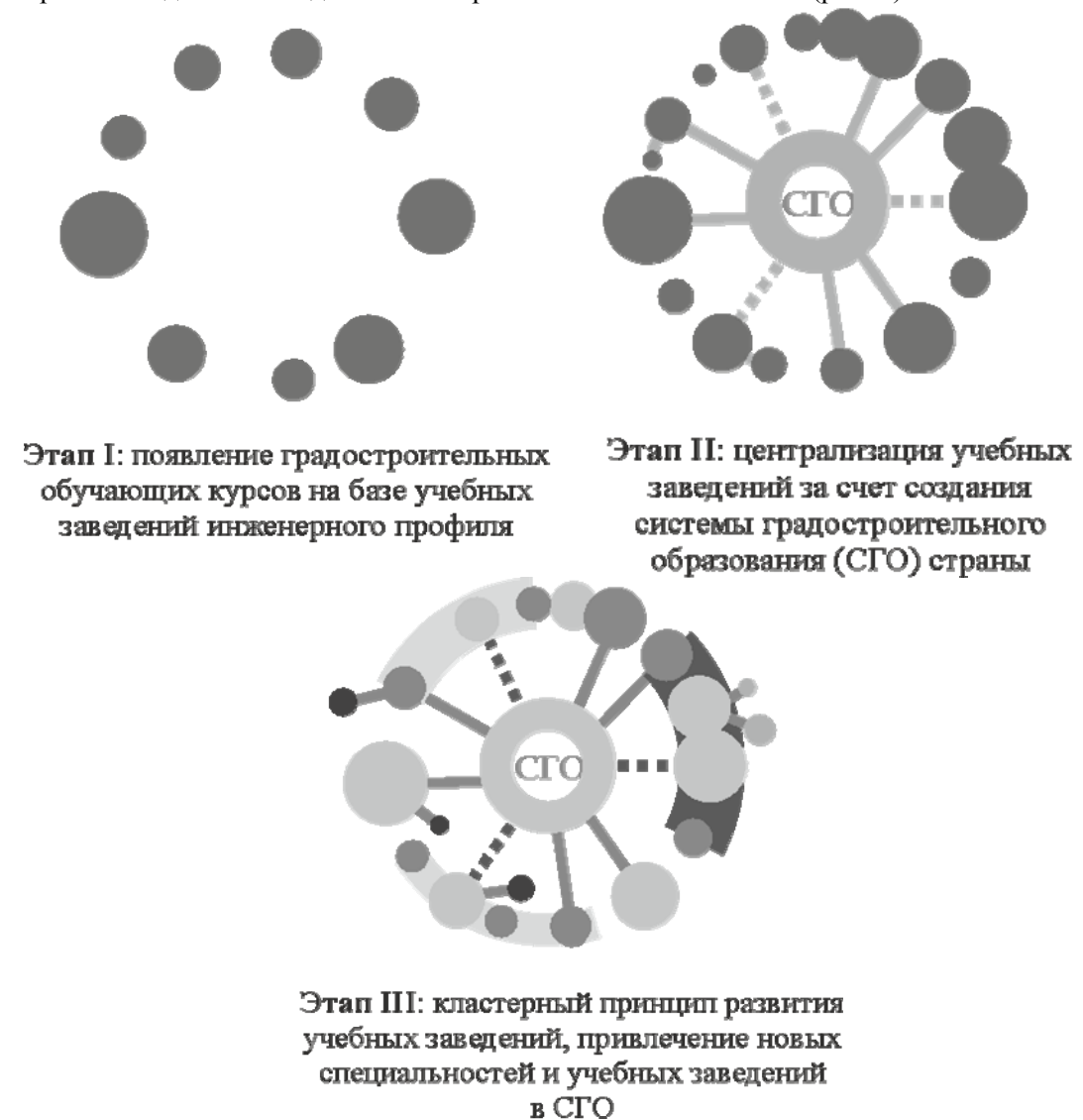


Рис. 1. Условная эволюция системы градостроительного образования в России

Таким образом, сегодня система российского градостроительного образования, сформированная в основе своей самостоятельными градостроительными школами может быть охарактеризована следующим образом:

- Организационно-идеологический аспект: находится в стадии активного разграничения с архитектурным и инженерным образованием, сопровождающегося сближением с некоторыми специальностями экономического, естественно-научного и гуманитарного образования.

- Организационно-методический аспект: в качестве «опорных» направлений подготовки могут быть выделены [5] «Градостроительство» (07.03.04) и профиль «Городское строительство» (27.01.05).

- Функционально-ролевой аспект: подготовка специалистов все еще ведется в интересах «планировочной» деятельности, с незначительными отклонениями в сферу «управленческой» и «дизайнерской» сферы.
- Методико-педагогический аспект: развиваемые в процессе обучения компетенции сформированы по группам (общекультурные, профессиональные) и соответствуют ограниченному кругу профессионально-ролевых моделей деятельности.
- Структурный аспект: развитие градостроительных школ преимущественно осуществляется на базе учебных заведений высшего профессионального образования; в Москве, Санкт-Петербурге и нескольких других крупных городах имеет место развитие внепрофессиональных образовательных и информационно-коммуникационных ресурсов, созданных с целью повышения базового градостроительного и средового образования жителей.

С позиций территориально-пространственного анализа размещение российских градостроительных школ соответствует местонахождению основных учебных заведений, в которых осуществляется подготовка по «опорным» специальностям («Градостроительство» и «Городское строительство»). Территориальная близость отдельных региональных школ, провоцирующая их на развитие совместных проектов, позволяет ввести понятие «района-кластера» [5] и разграничить 7 крупных кластеров на территории всей страны (рис. 2).



Рис. 2. Кластерный анализ размещения градостроительных школ России (современное состояние)

В табл. 1 приводятся количественные характеристики объемов работы современных градостроительных школ России: в 28 городах функционирует 31 вуз. Вопрос о необходимости увеличения численности специалистов в сфере градостроительства остается открытым для дискуссий, хотя многие видные российские деятели в сфере градостроительства и архитектуры высказываются в пользу увеличения числа вузов [6].

Задача усиления количественных показателей кадрового потенциала отрасли может быть решена и за счет изменения структуры качественных показателей. Например, в перспективе список «опорных» специальностей, включаемых в систему градостроительного образования, может и должен будет расширяться. Это связано с

необходимостью применения разных моделей обучения [7] (табл. 2) и с потребностями рынка труда, заинтересованного в кадровом разнообразии градостроительной деятельности.

Т а б л и ц а 1  
Количественные характеристики выявленных кластеров («опорные» специальности: Гр – «Градостроительство» и ГСХ – «Городское строительство и хозяйство»)

| Наименование района-кластера | Города                                                         | Результативность работы кластера, выпускников/в год |     |       |           |       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----|-------|-----------|-------|
|                              |                                                                | Бакалавров                                          |     |       | Магистров | Итого |
|                              |                                                                | ГСХ                                                 | Гр  | Всего |           |       |
| Центральный                  | Москва, Владимир, Тула, Орел, Воронеж, Брянск, Курск, Белгород | 225                                                 | 126 | 386   | 70        | 456   |
| Северо-Западный              | Санкт-Петербург                                                | 15                                                  | 50  | 65    | 29        | 94    |
| Южный                        | Сочи, Ростов-на-Дону, Новочеркасск, Волгоград                  | 179                                                 | 10  | 189   | 3         | 192   |
| Восточно-центральный         | Магнитогорск, Киров, Пермь, Казань, Самара, Оренбург,          | 105                                                 | 55  | 160   | нет       | 160   |
| Сибирский                    | Томск, Екатеринбург, Челябинск                                 | 50                                                  | 47  | 97    | нет       | 97    |
| Восточно-Сибирский           | Красноярск, Иркутск, Ангарск, Кызыл, Абакан                    | 107                                                 | 33  | 140   | 11        | 151   |
| Дальневосточный              | Хабаровск                                                      | 437                                                 | нет | 437   | нет       | 437   |
| Итого                        |                                                                | 1118                                                | 321 | 1474  | 113       | 1587  |

Т а б л и ц а 2  
Модели обучения в системе градостроительного образования РФ

| Условное наименование «модели» обучения (по [7] и [2]) |                      | Специальности и направления подготовки |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |                      | Современное состояние                  | Перспективы развития                                                                  |
| «Внеархитектурные» модели                              | Архитектурная модель | Градостроительство                     | Архитектура, ландшафтная архитектура, дизайн архитектурной среды                      |
|                                                        | Инженерная           | Городское строительство                | Землеустройство и кадастры, информационное обеспечение градостроительной деятельности |
|                                                        | Управленческая       | -                                      | Градостроительное администрирование                                                   |
|                                                        | Средовая             | -                                      | Градостроительные исследования и педагогика                                           |
|                                                        | Урбанистическая      | -                                      | Градостроительная экспертиза                                                          |



Подобное «ветвление» градостроительной специальности полностью соответствует мировым тенденциям в развитии схожих направлений обучения и позволит постепенно реформировать российские градостроительные школы за счет усиления зон их влияния в собственных регионах. В этом случае модель развития всей системы может быть основана на трансформации списка видов деятельности градостроителя – от «постсоветской» традиции «планировщика» и «оформителя» – к новым российским реалиям многоролевой деятельности, обеспечивающей все стороны функционирования городов (рис. 3).

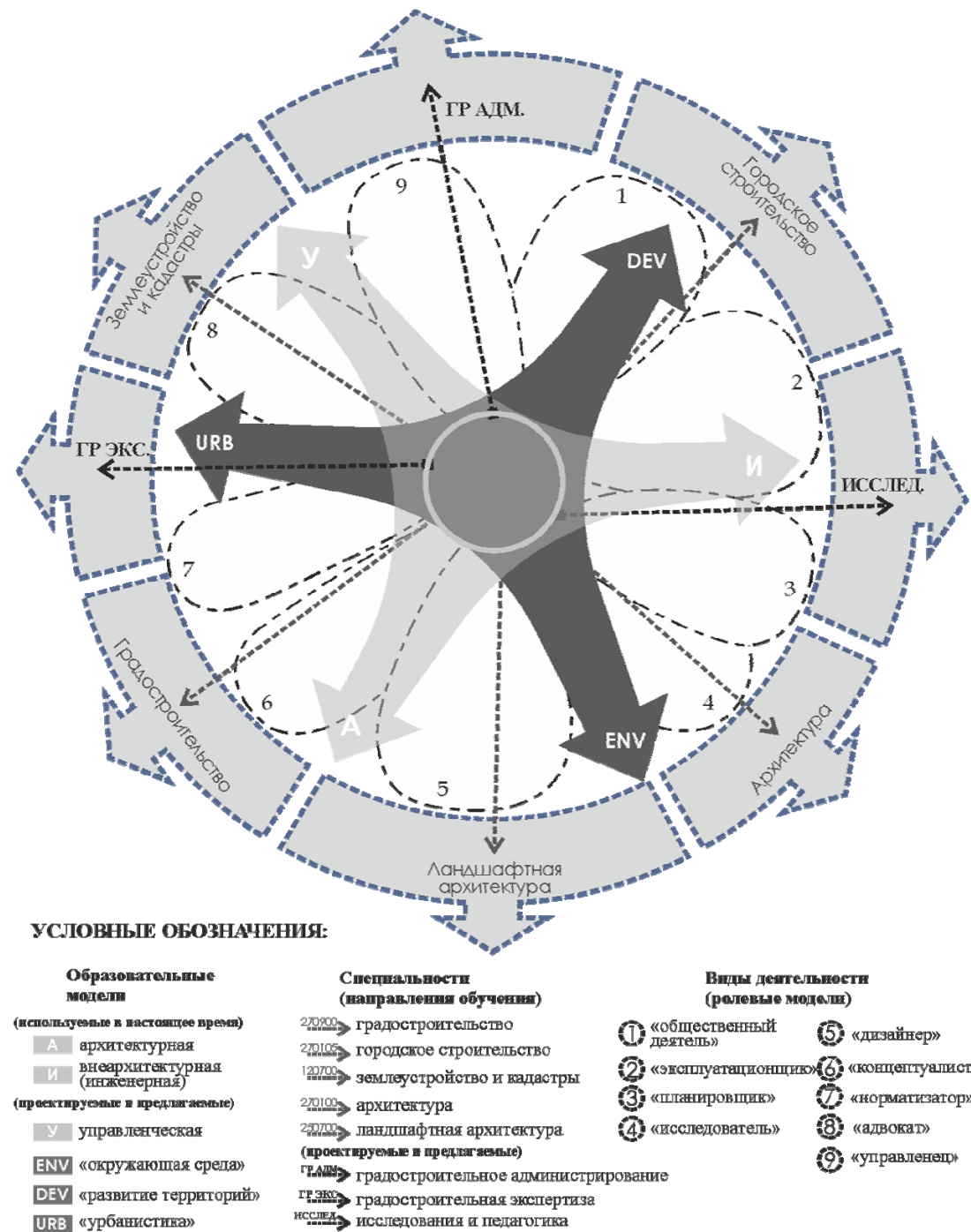


Рис. 3. Модель развития российской системы градостроительного образования

Территориально-пространственная структура размещения российских градостроительных школ в этом случае также приобретет устойчивость за счет увеличения численности учебных заведений (без учета возможности возникновения новых учебных заведений): с 31 до 120 вузов (рис. 4).



Рис. 4. Перспективный пространственный каркас системы российского градостроительного образования (31 градостроительная школа)

Подведем краткие итоги. Проблемы и состояние российских градостроительных школ последние несколько десятилетий остаются в тени дискуссий о судьбе российских городов, хотя имеют к ним непосредственное отношение. Преодоление этого информационного вакуума, естественно, не может быть решено в рамках одной статьи, однако можно предположить, что именно с очерчивания границ предмета исследования должно начаться его изучение. Выявленный перспективный потенциал: 120 вузов в 58 городах страны – выглядит вполне убедительным фундаментом для дальнейшего развития всей отрасли, системный совместный анализ этих учебных заведений увеличит шансы каждого вуза и всего российского градостроительства на сохранение и приумножение этого потенциала, рост его конкурентоспособности и устойчивости.

#### Список литературы

1. Шестернева, Н.Н. Тенденции развития градостроительного образования: понятийный аппарат / Н.Н. Шестернева // Вестник гражданских инженеров. – 2014 – №3(44). – С. 65–70.
2. Шестернева, Н.Н. Вопросы развития «внеархитектурной модели» в обучении градостроителей / Н.Н. Шестернева // Academia. Архитектура и строительство. – 2014 – №4. – С. 13.
3. Hirt, S; Stanilov, K; (2009) Twenty Years of Transition: The Evolution of Urban Planning in Eastern Europe and the Former Soviet Union, 1989-2009. Human Settlements Global Dialogue Series. UN HABITAT: Nairobi. – URL: <http://unhabitat.org/?wpdmac=process&did=NTM3LmhvdGxpbnms=>. (дата обращения: 17.05.2015)
4. Советский город 1940-х – первой половины 1950-х годов. От творческих поисков к практике строительства: монография / Ю. Л. Косенкова. – М.: УРСС, 2000. – 378 с.

5. Шестернева, Н.Н. Место и роль СПбГАСУ в системе градостроительного образования страны / Н.Н. Шестернева // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 4 (45) – С. 147–155.

6. Бочаров, Ю.П. К возрождению профессионального градостроения в России / Ю.П. Бочаров. – URL: <http://demoscope.ru/weekly/2009/0363/analit05.php> (дата обращения: 07.08.2014)

7. Градостроительство как система научных знаний: монография / В.В. Владимиров, Т.Ф. Саваренская, И.М. Смоляр: под ред. И.М. Смоляра. – М.: УРСС, 1999. – 120 с.

#### References

1. Shesterneva, N.N. Trends in urban education development: a conceptual framework / N. N. Shesterneva // Bulletin of civil engineers. – 2014 – №3(44). – P. 65–70.

2. Shesterneva, N.N. Development issues "unarchitectural models in the education of urban planners / N.N. Shesterneva // Academia. Architecture and construction. – 2014 – No. 4. –13 p.

1. Hirt, S; Stanilov, K; (2009) Twenty Years of Transition: The Evolution of Urban Planning in Eastern Europe and the Former Soviet Union, 1989-2009. Human Settlements Global Dialogue Series. UN HABITAT: Nairobi. – URL: <http://unhabitat.org/?wpdmact=process&did=NTM3LmhvdGxpbms=>.

4. Soviet city of the 1940s and the first half of the 1950-ies. From creative research to the practice of construction: monograph / Yu. L. Kosenkov. – М.: URSS, 2000. – 378 p.

5. Shesterneva, N.N. The place and role of architecture and civil engineering in the urban system of education / N.N. Shesterneva // Bulletin of civil engineers. – 2014. – № 4 (45) – P. 147–155.

6. Bocharov, Y.P. Professional revival architecture in Russia / Y. P. Bocharov. – URL: <http://demoscope.ru/weekly/2009/0363/analit05.php> (reference date: 07.08.2014).

7. The urban planning as a system of scientific knowledge: monograph / V.V. Vladimirov, T.F. Savarenskaya, I.M. Smolyar: ed. by I. M. Smolar. – М.: URSS, 1999. – 120 p.

УДК 697.137.2

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

**Береговой Александр Маркович**, доктор технических наук, профессор  
E-mail: ambereg@rambler.ru

**Дерина Мария Александровна**, соискатель кафедры «Городское строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Петрянина Любовь Николаевна**, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Beregovoy Aleksandr Marcovich**, Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: ambereg@rambler.ru

**Derina Marya Alecsandrovna**, Competitor of the department «Urban construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru;

**Petryanina Lyubov Nikolaevna**, Associate professor of the department «Urban construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru;

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕШЕНИЙ В АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

А.М. Береговой, М.А. Дерина, Л.Н.Петрянина

Обсуждаются вопросы энергосбережения в зданиях на примере их планировочных решений и использования технических средств. Дается технико-экономическая оценка вариантам проектирования по блокированию зданий и переносу части их надземных помещений в подземный этаж. Приводятся результаты расчета сроков окупаемости теплозащитных штор на окнах и упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора.

*Ключевые слова:* архитектурно-строительное проектирование, тепловые потери, срок окупаемости, экономическое обоснование, энергетическая эффективность

## TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ENERGY SAVING SOLUTIONS IN ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION DESIGN

A.M. Beregovoy, M.A. Derina, L.N. Petryanina

The issues of energy efficiency in buildings in relation to their planning decisions and the use of technical solutions are discussed. The technical and economic evaluation of design options for blocking buildings and transferins parts of them above ground in the underground basement are given. The results of the calculation of the payback period of thermal protection curtains on windows and simplified flat-plate solar collector are shown.

*Keywords:* architecture and construction design, heat loss, pay-back period, economic evaluation, energy efficiency

В решении проблемы энергосбережения в строительстве на первый план выходят вопросы технико-экономического обоснования принимаемых решений. Некоторые эффективные по экономии тепловой энергии мероприятия, например такие, как устройство конструкции «солнечной» стены здания, не находят широкого применения из-за большого срока окупаемости, составляющего 20 лет и более.



Определенные творческие возможности по повышению энергосбережения в зданиях без использования существенных затрат материально-технических ресурсов предоставляет стадия проектирования. В процессе оптимизации объемно-планировочного решения зданий энергосберегающий эффект может быть достигнут путем переноса части их надземных помещений в подземный этаж или за счет использования принципа блокирования зданий.

В подземных помещениях нет таких больших теплопотерь как в надземных из-за отсутствия инфильтрации холодного воздуха и благодаря большой теплоаккумулирующей способности окружающего грунтового массива, обеспечивающего относительно постоянство температур в подземном пространстве здания. В него может быть перенесен из надземных этажей целый ряд помещений второстепенного назначения с температурой воздуха  $t_b$ , которая заведомо ниже нормативной и обеспечивается за счет поступления тепла земли и теплового потока через цокольное перекрытие. Получаемый при этом эффект энергосбережения заключается в уменьшении площади отопления надземных этажей.

Результаты натурных обследований малоэтажных гражданских зданий, проведенных в г. Пензе в январе 2015 г., а также исследования других авторов показали, что в зависимости от конструктивного решения ограждений подвалов величина  $t_b$  их воздушной среды может достигать значений 9,5–16°C, приемлемых для размещения подсобных помещений и кратковременного пребывания людей.

В ходе анализа проектных решений трех общественных зданий, построенных в г. Пензе (табл.1), была установлена возможность переноса из надземной части в подземный этаж следующих подсобных помещений:

- кладовых для инвентаря, спецконтейнеров и спецпакетов, помещений архивов, электрошитовой, помещений для хранения оружия (в 3-этажном здании кассово-инкассаторского центра, расположенного по адресу: г.Пенза, ул. Калинина-Суматовка);
- холодильной и морозильной камеры, технического помещения, склада (в 2-этажном здании предприятия общественного питания быстрого обслуживания в районе улиц проспект Строителей, ул. Тернопольская);
- разгрузочного помещения, помещения для хранения тары, кладовых уборочного инвентаря, подсобного помещения (в торгово-офисном центре по ул. Лядова).

В табл.1 показан эффект сбережения тепловой энергии, который был бы получен в стадии проектирования при переносе рассмотренных надземных помещений в подземный этаж этих зданий с учетом текущей стоимости отопления их общей площади.

Т а б л и ц а 1

Энергосберегающий эффект при переносе подсобных помещений из надземных этажей в подземную часть зданий

| Назначение здания                 | $S_1$  | $S_2$ | $C_1$   | $C_2$   | Энергосберегающий эффект, % |
|-----------------------------------|--------|-------|---------|---------|-----------------------------|
| Кассово-инкассаторский центр      | 2782,7 | 399,7 | 58436,9 | 50044,3 | 14,4                        |
| Предприятие общественного питания | 492,5  | 42,0  | 10341,7 | 9460,3  | 8,5                         |
| Торгово-офисный центр             | 1407,2 | 53,1  | 29551,2 | 28437,0 | 3,8                         |

П р и м е ч а н и е. В таблице приняты обозначения:  $S_1$  и  $S_2$  – соответственно первоначальные и перенесенные в подземный этаж площади помещений, м<sup>2</sup>;  $C_1$  и  $C_2$  – стоимость их отопления, руб., соответственно первоначальная и после переноса помещений.

Табл. 1 показывает, что эффект сбережения тепловой энергии в обследованных зданиях при переносе подсобных помещений в подземный этаж составляет от нескольких процентов до 14 %.

Как известно, при блокировании объектов эффект экономии тепловой энергии достигается за счет уменьшения коэффициента компактности формы здания после блокирования. Однако при этом снижаются и единовременные затраты на возведение сблокированного здания.

Эффект энерго- и ресурсосбережения оценили на примере блокирования по линейной схеме десяти отдельно стоящих однотипных жилых домов с размерами в плане 4,5×8 м, имеющих высоту 6 м. Для фундаментов и стен подвалов были использованы бетонные блоки, для стен и перегородок – кирпичная кладка.

Энергоэффективность блокирования  $i$  зданий за счет уменьшения площади теплоотдающих поверхностей сблокированного дома определяли по формуле [1]

$$i = \frac{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}} - \sum 2S_{\text{нп}}}{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}} = 1 - \frac{\sum 2S_{\text{нп}}}{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}},$$

где  $\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}$  – сумма площадей наружных ограждающих конструкций отдельно стоящих зданий;  $\sum 2S_{\text{нп}}$  – удвоенная сумма площадей вновь образованных внутренних граней параллелепипеда.

Найденная величина  $i$  показала, что при блокировании данных домов может быть достигнут эффект энергосбережения, равный 33 %, при условии идентичности теплозащитных характеристик их наружных ограждающих конструкций.

Сметно-финансовые расчеты (СФР) на строительство отдельно стоящих однотипных зданий и сблокированного из них дома выполнили по действующим нормативным расценкам стоимости материалов, эксплуатации машин и труда рабочих. Эти расчеты показали значительную экономию материально-технических ресурсов при блокировании зданий, достигаемую за счет уменьшения протяженности наружных стен (П) и фундаментов под них (табл.2).

Т а б л и ц а 2

Затраты на строительство до и после блокирования

| Этапы расчета      | $\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}, \text{ м}^2$ | П, м | Затраты на строительство, руб. |         |
|--------------------|------------------------------------------------|------|--------------------------------|---------|
|                    |                                                |      | фундаментов                    | стен    |
| До блокирования    | 1524                                           | 254  | 76 373 .                       | 917 983 |
| После блокирования | 1016                                           | 89   | 55 651                         | 622 221 |

Технико-экономическую эффективность технических решений определяли на примере использования теплозащитных штор в конструкциях окон и упрощенного варианта плоского солнечного коллектора на инсолируемых поверхностях наружных ограждений здания.

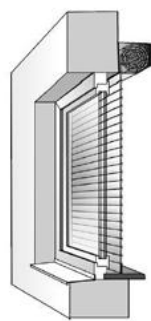


Рис. 1. Схема окна с теплозащитной шторой

Как известно, использование теплозащитных штор в темное время суток позволяет снизить тепловые потери через окна в результате увеличения их сопротивления теплопередаче (рис.1).

Выполненный расчет срока окупаемости инвестиций в данное техническое решение с учетом дисконтирования поступающих доходов показал, что этот срок составляет 39 лет. С целью его снижения за основу конструктивного решения теплозащитных штор был взят ближайший аналог – светозащитные шторы, для которых выполнили проектную доработку конструкции в виде наклеенных на ленты штор пенополистирольных полосок толщиной 2 см и пластмассовых направляющих, обеспечивающих плотное примыкание штор к откосам оконного проема. Для двухкамерного стеклопакета это позволило увеличить сопротивление теплопередаче с 0,55 до 0,9 м<sup>2</sup>·°C/Вт.

С учетом технической доработки срок окупаемости теплозащитных штор составил 8 лет, а ежегодный расчетный промежуточный доход за счет экономии энергоресурсов –

153 руб./год с одного окна. При этом тепловые потери рассмотренного выше жилого блока при использовании теплозащитных штор в окнах снизились с 38717 до 3685 кВт·ч/год.

Широкое использование заводской конструкции плоского солнечного коллектора (ПСК) в энергоактивных зданиях сдерживается из-за его относительной дороговизны. Упрощенный вариант ПСК, разработанного в Пензенском ГУАС (ПГУАС) и совмещенного с наружными ограждениями 2-этажного жилого дома площадью 122 м<sup>2</sup>, рассмотрен в работе [2]. Оценку его технико-экономической эффективности выполнили в соответствии с комплексной методикой по обследованию и энергоаудиту реконструируемых зданий [3] и методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов.

Результаты численного эксперимента, проведенного по данной методике, подтвердили эффективность использования разработанной конструкции ПСК, установленной на южной стороне малоэтажного жилого здания: ее срок окупаемости при суммарной площади 35,4 м<sup>2</sup> составляет шесть месяцев, что практически совпадает с продолжительностью отопительного периода для II климатического района, а чистый дисконтированный доход равен 32 818 руб. Результаты аналогичных расчетов для других видов ПСК, выпускаемых на промышленной основе, показаны на рис.2.

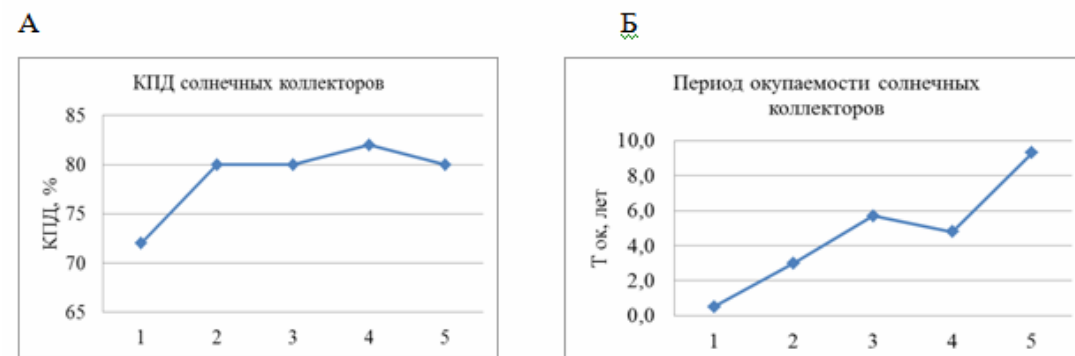


Рис.2. КПД (А) и окупаемость (Б) различных типов плоских солнечных коллекторов:  
1 – ПГУАС; 2 – Сокол; 3 – VFK 145V; 4 – Wolf TopSon; 5 – Vitosol

Как видно из рис. 2, солнечный коллектор ПГУАС по сравнению с другими конструкциями коллекторов при относительно невысоком КПД имеет наименьший срок окупаемости, что говорит о рентабельности его использования.

Таким образом, на конкретных примерах планировочных решений дана оценка энергосберегающего эффекта по использованию способа блокирования зданий и переноса части их надземных помещений в подземный этаж. Результаты расчета сроков окупаемости показали целесообразность применения теплозащитных штор путем доработки их светозащитного варианта, а также упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора.

#### Список литературы

1. Береговой, А.М. Энергосбережение в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.П.Прошин, В.А.Береговой // Жилищное строительство. – 2002. – №5. – С. 4–6.
2. Береговой, А.М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, В.А. Береговой. – 3-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 200 с.
3. МДС 13-20.2004. Комплексная методика по обследованию и энергоаудиту реконструируемых зданий: пособие по проектированию / Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений. – М., 2004.

#### References

1. Beregovoy, A.M. Energy saving in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.P. Proshin, V.A. Beregovoy //Housing construction. – 2002. – No 5. – P. 4–6.
2. Beregovoy, A.M. Energy-efficient and energy active buildings in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.V. Grechishkin, V.A. Beregovoy. – 3-e ed., revised and enlarged. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2012. – 200 p.
3. MDS 13-20.2004. Complex methodology of survey and energy audit of reconstructed buildings: manual for design / Central research and experimental design Institute of industrial buildings and structures. – M., 2004.

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 338.984

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

**Учаева Татьяна Владимировна**,  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Экономика, организация и  
управление производством»  
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40

**Тусков Андрей Анатольевич**,  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Экономическая кибернетика»  
E-mail: tuskov@gmail.com

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

**Uchaeva Tatiana Vladimirovna**,  
Candidate of Economic Sciences, Associate  
Professor of «Economics, Organization and  
Management»  
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Penza State University  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.

**Tuskov Andrey Anatolievich**,  
Candidate of Economic Sciences, Associate  
Professor of «Economic Cybernetics»  
E-mail: tuskov@gmail.com

## АНАЛИЗ ЗАТРАТ НА ПРОЦЕСС МАЛЯРНЫХ РАБОТ С ГАРАНТИРОВАННЫМ УРОВНЕМ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Т.В. Учаева, А.А. Тусков

Приведены сведения о результатах анализа затрат в процессе окрашивания поверхности строительных изделий и конструкций в зависимости от уровня дефектности на каждой стадии процесса.

Даны рекомендации по повышению эффективности процесса окрашивания, применению статистических методов управления качеством продукции к анализу процесса получения лакокрасочных покрытий с заданными свойствами.

*Ключевые слова:* уровень дефектности, затраты на процесс, окраска поверхности

## ANALYSIS OF COSTS OF PAINTING WORK WITH A GUARANTEED LEVEL OF COATINGS QUALITY

Т.В. Uchaeva, А.А. Tuskov

Some information about the results of cost analysis in the process of coloring the surface of construction products and structures depending on the level of defects at each stage of the process is given.

Recommendations on improving the efficiency of dyeing process, application of statistical methods of quality control to the analysis of the process of obtaining coatings with desired properties are listed.

*Keywords:* defect rate, the cost of the process, painting surface

В соответствии с всеобщим менеджментом качества основой улучшения качества и производительности предприятий является управление процессами, а не только конечными результатами, следовательно, модель затрат должна отражать полные затраты в каждом процессе.

ГОСТ Р ИСО/ТО 10014-2005 «Руководство по управлению экономикой качества» содержит концепцию и методологию управления экономикой качества. Реализацию методологии начинают с анализа процессов предприятия. Это обеспечивает возможность идентификации, текущего контроля и занесения в отчет операций и связанных с ними затрат.

Для определения затрат предприятие должно идентифицировать операции процесса и контролировать затраты, связанные с каждой операцией выбранных процессов.

Любой показатель, характеризующий качество продукции, как правило, имеет односторонние и двусторонние допуски с заданными значениями (ВГД и НГД – верхние и нижние границы допуска). Выход за границы допуска приводит к браку. Уровень дефектности  $q$  может быть определен в соответствии с формулой

$$q = 1 - \frac{\text{число дефектных единиц}}{\text{общее число единиц продукции}}. \quad (1)$$

Известно, что распределение показателей качества строительных материалов подчиняется нормальному закону распределения.

На рис. 1 изображены «идеальный» процесс (кривая 1), когда среднее значение  $\bar{R}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  обеспечивают идеальное качество, и «критический» процесс (кривая 2), при котором даже самое незначительное ухудшение параметров (снижение среднего  $\bar{R}$  или увеличение среднего квадратического отклонения  $\sigma$ ) приведет к превышению допустимой доли дефектности [1, 2].

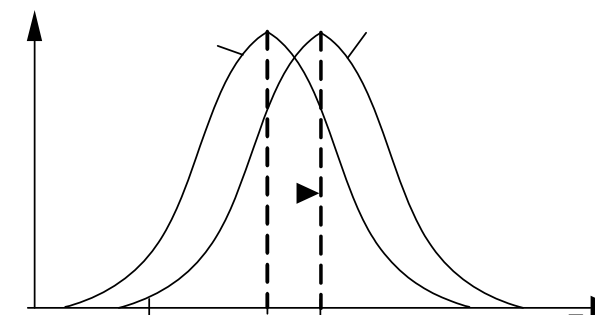


Рис. 1. Законы распределения средних значений показателя качества  $R$

Низкое значение уровня дефектности, на первый взгляд, свидетельствует об эффективности производственного процесса. Однако если рассмотреть внутренние показатели дефектности и затраты на каждой операции, то они позволяют представить в количественном выражении объем доработок и связанных с этим дополнительных затрат в течение процесса.

Рассмотрим результаты анализа дефектности процесса получения защитно-декоративных покрытий строительных изделий и конструкций. В соответствии с ТР 140-03 «Технические рекомендации по технологии окраски интерьеров и фасадов строящихся жилых и общественных зданий» процесс производства малярных работ состоит из следующих операций:

- очистка поверхности;
- оштукатуривание очищенной поверхности и упрочнение слабых осыпающихся оснований;
- шпательование;
- грунтование;

- нанесение первого слоя краски;
- нанесение второго слоя краски.

Предположим, данные на выходе процесса свидетельствуют о конечном объеме выхода качественных окрашенных изделий в размере 98 %, т.е. из 1000 окрашенных изделий 980 изделий окрашено без брака, а 20 изделий забракованы (величина брака составляет 2 %).

Как уже отмечалось, процесс производства малярных работ состоит из 6 операций, каждая из которых подразумевает определенный уровень дефектности. Предположим, что в процессе операционного контроля были выявлены дефектные изделия, которые были направлены на доработку. В табл.1 приведены значения уровня качества на каждой стадии процесса.

Анализ данных, приведенных в табл.1, показывает, что на доработку направлено 84 единицы продукции. Фактическое качество производственного процесса составляет:

$$1 - \frac{84 \text{ единиц доработки}}{1000} = 0,916 = 91,6\% . \tag{2}$$

Поэтому значение уровня качества, составляющее 98 %, не отражает реальной картины качества процесса.

Т а б л и ц а 1

Уровень дефектности процесса окрашивания строительных изделий и конструкций

| № п/п | Наименование операции                                                      | Число единиц на входе | Число единиц на выходе | Число единиц, направленных на доработку | Качество процесса, % |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| 1     | Очистка поверхности                                                        | 1000                  | 970                    | 30                                      | 97,0                 |
| 2     | Огрунтовка очищенной поверхности и упрочнение слабых осыпающихся оснований | 970                   | 950                    | 20                                      | 97,93                |
| 3     | Шпатлевание                                                                | 950                   | 935                    | 15                                      | 98,42                |
| 4     | Грунтование                                                                | 935                   | 930                    | 5                                       | 99,46                |
| 5     | Нанесение первого слоя краски                                              | 930                   | 926                    | 4                                       | 99,57                |
| 6     | Нанесение второго слоя краски                                              | 926                   | 916                    | 10                                      | 98,92                |

Такое несоответствие между показателями качества (98 % и 91,6 %) обусловлено тем, что за значением «98 %» скрываются дефекты, устраняемые в ходе процесса. 84 единицы были направлены на доработку, из них 64 исправлены и возвращены в процесс окрашивания.

Анализ данных, приведенных в табл.1, показывает, что по показателю уровня дефектности наибольшего внимания требуют операции очистки поверхности, грунтовки очищенной поверхности и упрочнения слабых осыпающихся оснований, а также шпатлевание поверхности.

Нами проведен экономический расчет дополнительных затрат, вызванных доработкой единиц продукции. Предположим, что изделия имеют размеры 1,5×6 м. В соответствии с ТЕР 81-02-15-2001 по Пензенской области ущерб, вызванный тем, что 20 изделий (площадью 180 м²) оказались дефектными, составляет :

$$У = 3 \cdot K_{\text{индекс}} \cdot S = 1830,48 \cdot 4,491 \cdot 1,8 = 14797,24 \text{ руб.} ,$$

где У – ущерб (недополученная выгода), руб.; K<sub>индекс</sub> – коэффициент индексации, составляющий 4,491 (с НДС и материалами); 3 – прямые затраты, в том числе оплата труда, материалы, эксплуатация машин; S – увеличении площади по сравнению со 100 м².

В предположении, что дефекты были допущены:

- при шпатлевании поверхности (15 единиц были направлены на доработку);
- при очистке поверхности, грунтовке очищенной поверхности и упрочнении слабых осыпающихся оснований (20 единиц были направлены на доработку),

дополнительно прямые затраты составляют:

$$\text{– при шпатлевании } 15 \text{ изделий площадью } 135 \text{ м}^2$$
$$ДЗ = 3 \cdot K_{\text{индекс}} \cdot S = 373,57 \cdot 4,491 \cdot 1,35 = 2264,9 \text{ руб.} ;$$

- при очистке поверхности, грунтовке очищенной поверхности и упрочнении слабых осыпающихся оснований 20 изделий площадью 180 м²

$$ДЗ = 3 \cdot K_{\text{индекс}} \cdot S = 3600 \text{ руб.}$$

Таким образом, дополнительные прямые затраты составляют:

$$ДЗ = 2264,9 + 3600 + 14797,24 = 20669,14 \text{ руб.}$$

Можно сделать вывод, что учет экономических затрат на каждой стадии процесса позволит предприятию найти резервы для повышения эффективности производства. Реальным способом снижения финансовых потерь является увеличение числа среднеквадратических отклонений показателей качества в поле допуска, что рекомендует методология «шесть сигм» [1]. В табл. 2 приведены числовые значения уровня дефектности в зависимости от числа среднеквадратических отклонений σ в поле допуска.

Т а б л и ц а 2

Вероятность выхода случайной величины за границы допуска ( $m \pm k\sigma$ )

| ε / P | Нормальный закон распределения |                         |
|-------|--------------------------------|-------------------------|
|       | Два хвостовых участка          | Один хвостовой участок  |
| 2σ    | $45500 \cdot 10^{-6}$          | $22750 \cdot 10^{-6}$   |
| 3σ    | $2699 \cdot 10^{-6}$           | $1395 \cdot 10^{-6}$    |
| 4σ    | $63,372 \cdot 10^{-6}$         | $31,686 \cdot 10^{-6}$  |
| 5σ    | $0,5742 \cdot 10^{-6}$         | $0,28715 \cdot 10^{-6}$ |
| 6σ    | $0,00198 \cdot 10^{-6}$        | $0,001 \cdot 10^{-6}$   |

Анализ данных, приведенных в табл.2, свидетельствует, что уменьшение разброса показателей качества на каждой стадии процесса способствует снижению числа дефектных изделий и, соответственно, затрат на их исправление.

Кроме того, для успешного снижения затрат на исправление дефектов необходимо проводить предупреждающие действия, а также меры по улучшению качества, заключающиеся в сокращении количества дефектной продукции, улучшении процессов, получении сертификации по ИСО 9001.

Список литературы

1. Логанина, В.И. К вопросу о достоверности контроля при производстве бетона / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 24–26.  
2. Логанина, В.И. Статистическое управление производством строительных изделий / В.И. Логанина, Б.Б. Хрусталева, Т.В. Учаева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 3 (61). – С. 65–67.

References

1. Loganina, V.I. On the reliability of quality control in the production of concrete / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // Bulletin of Belgorod State Technological University. VG Shukhov. – 2011. – № 4. – P. 24–26.  
2. Loganina, V.I. Statisticheskoe management Building Products / V.I. Loganina, B.B. Hrustalev, T.V. Uchaeva // East European Journal of advanced technologies. – 2013. – T. 1, № 3 (61). – P. 65–67.