



eISSN 2311-2468
Том 3, № 13. 2015
Vol. 3, no. 13. 2015

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



ОШКИНА Л. М., САРАЙКИН А. С.

ЯВЛЕНИЯ МАССОПЕРЕНОСА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. Рассмотрены явления массопереноса в капиллярно-пористых материалах в случае одновременного протекания диффузионного и фазового процессов. Представлены выражения для определения эффективного коэффициента диффузии, ширины диффузионной области, а также зоны коррозионных повреждений цементного камня.

Ключевые слова: диффузионный процесс, фазовый процесс, массоперенос, капиллярно-пористый материал, концентрация, градиент, агрессивная среда, химическое реагирование, поток жидкости, коэффициент диффузии, пористость, уравнение Фика, коэффициент Пуассона, композиционный материал, строительная конструкция.

OSHKINA L. M., SARAIKIN A. S.

MASS TRANSFER IN CAPILLARY-POROUS MATERIALS

Annotation. The article considers mass transfer in capillary-porous materials in case of simultaneous occurrence of diffusion and phase process. The authors present a number of equations for determining the effective diffusion coefficient, the width of the diffusion field as well as the areas of the cement stone corrosion.

Keywords: diffusion, phase process, mass transfer, capillary-porous material, concentration, gradient, aggressive environment, chemical reaction, fluid flow, diffusion coefficient, porosity, Fick's equation, Poisson's ratio, composite material, building construction.

В процессе проектирования конструкций и изделий из композиционных материалов важно знать, как протекают процессы деградации, проявляющиеся в изменении жесткости и несущей способности конструкций. При описании диффузионных процессов возможны два подхода: молекулярно-кинетический и феноменологический. Молекулярно-кинетический базируется на изучении элементарных процессов, лежащих в основе диффузии.

Феноменологическая теория диффузионных процессов описывает перенос множества частиц вещества, не выясняя сущности элементарных процессов, лежащих в основе диффузионных явлений. Согласно [1; 2; 3] поток вещества I , диффундирующего в направлении x , прямо пропорционален градиенту концентрации, что описывается первым уравнением Фика

$$I = -D \text{grad} c = -D(\partial c / \partial x). \quad (1)$$

Процесс выравнивания разности концентраций и, соответственно, разности химических потенциалов в композите происходит за счет диффузионного и фазового

переноса агрессивной среды и ее химического взаимодействия с реакционноспособными компонентами.

Химическое реагирование среды и композита происходит по местам реакционноспособных групп связующих и наполнителей. Скорость распада химических связей под действием агрессивной среды v определяется из уравнения:

$$v = (\partial c)/(\partial t) = -k_0 (c_c)^n (c_n)^m, \quad (2)$$

где c_c – концентрация среды; c_n – концентрация реагента в композите; n, m – порядок реакции; k_0 – константа скорости реакции [1].

Концентрацию среды можно теоретически определить из уравнения Фика с учетом ее расхода на химическую реакцию:

$$(\partial c)/(\partial t) = D ((\partial^2 c)/(\partial x^2)) - v. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) являются основными для определения скорости химической деструкции и кинетических параметров деградации композита под воздействием агрессивной среды. При длительном действии агрессивной жидкости возможна реализация как диффузионного, так и фазового переноса.

Перенос жидкости в композитах с капиллярно-пористой структурой подчиняется закону Дарси [2]:

$$v_\phi = -D_\phi \text{grad} P \quad (4)$$

и может обуславливаться как гидростатическим, так и капиллярным давлением.

Тогда поток жидкости, переносимой в направлении оси X , можно определить как сумму потоков

$$I_m = -D (\partial c/\partial x) + v_{\phi x} c. \quad (5)$$

Так как $\partial c/\partial t = -\partial I/\partial x$, то получаем

$$\partial c/\partial t = D (\partial^2 c/\partial x^2) - v_{\phi x} (\partial c/\partial x), \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии; $v_{\phi x}$ – скорость фильтрационного движения, определенного законом Дарси:

$$v_{\phi x} = -k/\eta (\partial P/\partial x). \quad (7)$$

Согласно [2], уравнение (6) приводится к обычному уравнению диффузии путем преобразования

$$x_1 = x - v_{\phi x} t. \quad (8)$$

С учетом (8) уравнение (6) примет вид

$$\partial c/\partial t = D_3 (\partial^2 c/\partial x_1^2), \quad (9)$$

где D_3 – эффективный коэффициент диффузии.

Эффективный коэффициент диффузии очень часто используется в практических целях, так как сложные явления, происходящие при совместном действии химических и диффузионных процессов, не позволяют определять истинные параметры деградации.

Ширина диффузионной области, согласно [1], определяется по формуле:

$$a = k(\xi)\sqrt{Dt}, \quad (10)$$

где D – коэффициент диффузии; t – время воздействия агрессивной среды; $k(\xi)$ – коэффициент, определяемый аналитически или графически.

Очевидно, что в случае одновременного протекания диффузионного и фазового переноса, зона коррозионных повреждений цементного камня (зона переднего фронта коррозии) будет определяться как:

$$a = k(\xi)\sqrt{Dt} - v_{\text{фх}}t. \quad (11)$$

Экспериментальные данные [4; 5], отражающие изменение этой характеристики, хорошо аппроксимируются функцией вида

$$a = -bt + c\sqrt{t}, \quad (12)$$

где t – время воздействия агрессивного раствора; b и c – коэффициенты уравнения, которые определяются методом наименьших квадратов.

На рис. 1 представлен график, отражающий зависимость между экспериментальными и теоретическими значениями ординаты переднего фронта коррозии для образцов цементного камня.

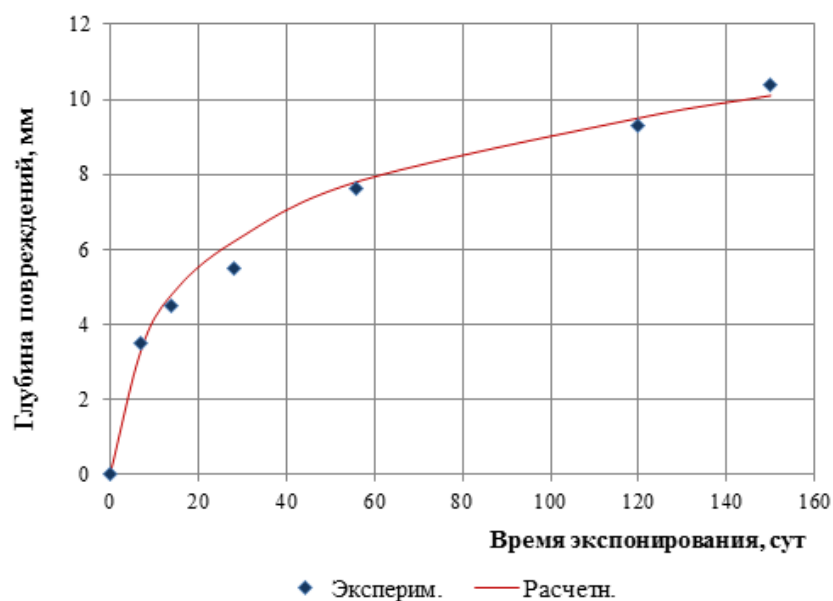


Рис. 1. Перемещение переднего фронта коррозии на образцах цементного камня.

Цементный камень является наиболее уязвимой составляющей тяжелых бетонов при агрессивном воздействии кислых растворов малой концентрации (например, 2%-го раствора серной кислоты). Аналитическая зависимость в данном случае имеет вид:

$$a = -0,00196t + 0,0656\sqrt{t}. \quad (13)$$

Изохроны деградации цементных композитов позволяют определять коэффициент переноса агрессивной среды в материал (рис. 2).

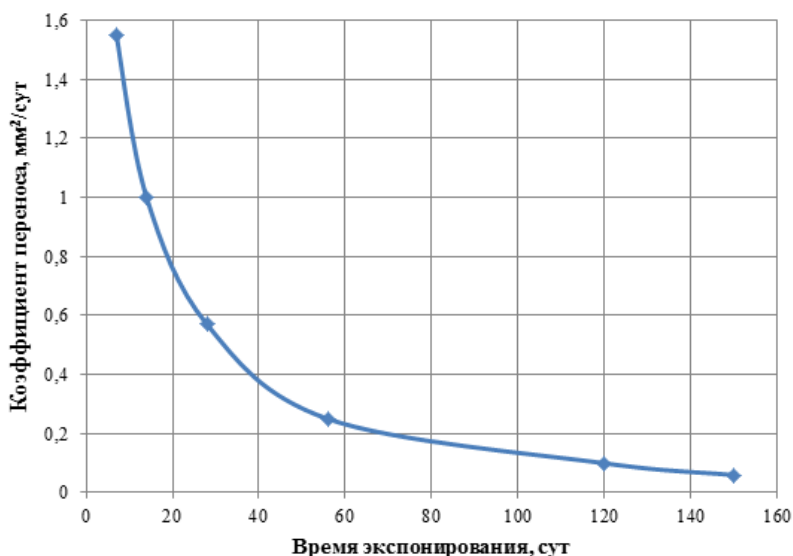


Рис. 2. Коэффициент переноса агрессивной среды для образцов цементного камня.

Знание механизма массопереноса в капиллярно-пористых телах, подвергающихся механическим напряжениям, а также возможность описания этих явлений аналитически необходимы для описания процессов деградации цементных композитов при действии агрессивных сред и прогнозирования поведения и срока службы материала конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломатов В. И., Селяев В. П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
2. Лыков А. В. Тепломассобмен (Справочник). – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
3. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
4. Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов при совместном действии сжимающих напряжений и жидких агрессивных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 16 с.
5. Селяев В. П., Соломатов В. И., Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 152 с.

КОРОТИН А. И., ЛАЗАРЕВ А. Л., СВЯТКИНА Г. Н.

**ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Аннотация. Изложены основные принципы методов контроля металлических конструкций ультразвуковыми методами. Приведены примеры современных аппаратов для осуществления контроля. Обозначены направления дальнейшего развития оборудования и методов ультразвукового контроля.

Ключевые слова: ультразвук, волна, методы контроля, ультразвуковой дефектоскоп.

KOROTIN A. I., LAZAREV A. L., SVYATKINA G. N.

**APPLICATION OF ULTRASONIC TESTING METHODS FOR ASSESSING QUALITY
OF METAL STRUCTURES UNDER MODERN CONDITIONS**

Abstract. The article deals with the basic principles of testing metal structures by ultrasonic methods. The authors present a review of relevant modern devices. The directions of further development of equipment and methods of ultrasonic testing are considered.

Keywords: ultrasound wave, control methods, ultrasonic flaw detector.

Применение ультразвука для выполнения работ по контролю материала в строительной отрасли стало активно развиваться с начала второй половины 20-го века. На тот момент техническая реализация методов ультразвукового контроля была обусловлена созданием первых серийных ламповых дефектоскопов и разработкой ультразвуковых преобразователей на основе пьезокерамических элементов. За достаточно большой период времени, прошедший сначала широкого внедрения методов ультразвукового контроля в строительстве и других областях промышленности накоплен богатый теоретический и практический объем знаний.

Широкое применение ультразвуковой контроль (УЗК) нашел в практике экспертизы изделий и конструкций, занимая главенствующее положение. На его долю приходится более 30% всего объема подобного контроля. На сегодняшний день, не смотря на высокий уровень автоматизации труда, доля ручного ультразвукового контроля остается значительной. Это связано с тем, что большие объемы работ проводятся на объектах, находящихся в эксплуатации: металлические конструкции зданий и сооружений различного назначения, мосты и теплотрассы из металлических и железобетонных конструкций, атомные и тепловые электростанции, магистральные газо- и нефтепроводы, трубопроводы различного назначения, транспортные средства и т.д. Характерной чертой указанных объектов является

большое разнообразие конструкций, конфигураций изделий, а, следовательно, методов и методик. Поэтому ультразвуковой контроль очень сложно поддается проведению универсальными автоматизированными способами.

Сегодня выделяют две группы методов акустического контроля: активные и пассивные. В основу активных положен процесс излучения с последующей регистрацией ультразвуковых волн в виде отраженных, прошедших или дифрагированных сигналов. При пассивных методах осуществляется только прием ультразвуковых волн, образующихся в объекте контроля.

Выделяют шесть методов, которые аккумулируют основные принципы ультразвукового контроля: теневой, эхо-метод, зеркальный эхо-метод, дельта-метод, сквозной эхо-метод и акустико-эмиссионный метод [1].

Ультразвуковой контроль, в зависимости от определенных условий состояний контролируемого объекта (характер, марка материала, толщина, геометрические особенности поверхностей контроля, минимально-выявляемые размеры дефектов и др.), зачастую предполагает использование специализированных средств контроля. Дефектоскопы, преобразователи и вспомогательные средства должны позволить реализовать одну из возможных методик и обладать набором необходимых функциональных устройств и программ.

Теневой метод основан на передаче в контролируемое изделие упругих колебаний и регистрации изменения их интенсивности после однократного прохождения через контролируемый объем. Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), излучающий УЗ колебания, находится по одну сторону контролируемого объекта или его участка, приемный ПЭП находится с другой его стороны соосно с излучателем. Недостатками метода являются сложность ориентации пьезоэлектрического преобразователя относительно центральных лучей диаграммы направленности, невозможность точной оценки координат дефектов и более низкая чувствительность (менее 10...20 раз) по сравнению с другими методами УЗК. К преимуществам следует отнести высокую помехоустойчивость и отсутствие мертвой зоны поиска дефектов. С помощью данного метода достаточно уверенно обнаруживаются наклонные дефекты, не дающие прямого отражения при других методах контроля.

При использовании эхо-метода современный дефектоскоп работает, как правило, в импульсном режиме, поэтому данный метод часто называют эхо-импульсным. Современный эхо-метод УЗК основан на излучении в контролируемое изделие коротких импульсов упругих колебаний и регистрации интенсивности (амплитуды) и времени прихода эхо-сигналов, отраженных от дефектов отражателей.

Кроме преимущества одностороннего доступа, он также имеет наибольшую чувствительность к выявлению внутренних дефектов, высокую точность определения координат дефектов. К недостаткам метода следует отнести, прежде всего, низкую помехоустойчивость к наружным отражателям (усиление, провисание) и резкую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта.

Зеркальный эхо-метод использует сигналы, зеркально отраженные от поверхности изделия или дефекта. На практике существует несколько вариантов этого метода. Для выявления дефектов с вертикальной ориентацией целесообразно применять вариант, называемый способом тандем (рис.1).

Особенностью этого способа является постоянство суммы

$$x_1 + x_2 = 2Htg\alpha = const. \quad (1)$$

Для получения зеркального отражения от дефектов с ориентацией, отличающейся от вертикальной, $x_1 + x_2$ варьируют. Для реализации способа тандем при проведении ультразвукового контроля сооружений из металлических конструкций излучатель и приемник размещаются как на одной поверхности изделия (приемник в точке В на рис. 1), так и на двух поверхностях (приемник показан пунктиром в точке Д). Такой вариант называется К-методом.

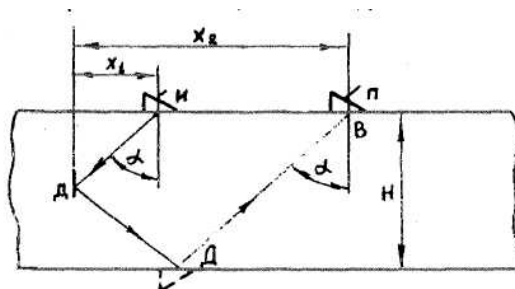


Рис. 1. Вариант зеркального эхо-метода – способ тандем.

При оценке формы дефектов необходимым условием является использование ПЭП одинаковой чувствительности. Метод нашел широкое применение при контроле толстостенных изделий, когда требуется высокая надежность обнаружения вертикально-ориентированных плоскостных дефектов.

Дельта-метод использует явление дифракции волн на дефекте (рис. 2). Признаком наличия дефекта является появление эхо-импульса в зоне контроля. К недостаткам метода следует отнести необходимость зачистки шва, сложность расшифровки принятых сигналов при контроле соединений толщиной менее 15 мм, трудности при настройке чувствительности и оценке размеров дефектов.

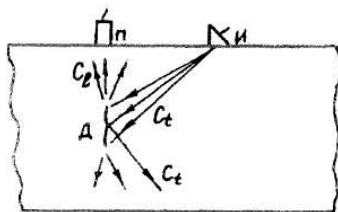


Рис. 2. Дельта-метод УЗ контроля.

Сквозной эхо-метод основан на анализе однократно и двукратно сквозных прошедших сигналов. Сущность метода представлена на схеме рис. 3. Здесь, в отличие от обычного эхо-метода, излучение и прием сигналов производится различными ПЭП, расположенными строго соосно с противоположных сторон изделия. Если на пути распространения ультразвуковых колебаний встретится дефект, то возникнут эхо-сигналы II и III. Последние достигнут приемника в интервале времени между приходом импульсов I и IV, последовательно отразившись от дефекта и от одной из поверхностей листа.

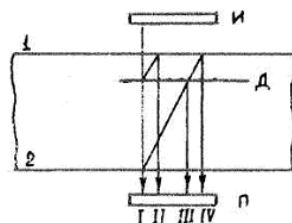


Рис. 3. Схема УЗ контроля сквозным эхо-методом.

Этот метод применяют для автоматического контроля изделий простой формы. По сравнению с теньевым методом, эхо-сквозной метод обладает более высокой чувствительностью и меньшей величиной мертвой зоны по сравнению с эхо-методом. К недостаткам метода следует отнести малую точность оценки координат дефектов.

Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации акустических волн, излучаемых дефектом при нахождении конструкций в напряженно-деформированном состоянии. Источниками волн могут быть процессы движения дислокаций, пластические деформации, фазовые превращения, возникновение и развитие усталостных трещин, горение сварочной дуги и др. Метод применяют для контроля сварных соединений высоконагруженных изделий и конструкций.

Для контроля металлических элементов методом акустической эмиссии обычно применяется многоканальная аппаратура. Каждый канал соединен со своим преобразователем, принимающим упругую волну из изделия по определенной системе. Метод акустической эмиссии позволяет не только обнаруживать опасные дефекты, но и прогнозировать работоспособность ответственных элементов конструкций (конструкции мостов, сосудов высокого давления, узлов атомных реакторов, деталей летательных аппаратов и т.д.).

Разнообразие методов и специфика формируют многообразие требований к аппаратуре для проведения контроля. Одним из основных недостатков ультразвукового контроля традиционным ручным методом является то, что после него не остается объективных документов (дефектограмм), по которым можно было бы контролировать работу самих операторов. Это обуславливает зависимость оценки качества шва от квалификации, психофизиологического состояния и условий работы оператора. Иными словами, можно констатировать, что достоверность ручного контроля почти целиком определяется персональной надежностью оператора. Поэтому очевидна необходимость автоматизации ультразвукового контроля.

Автоматизация ультразвукового контроля развивается по пути многофункциональности и роботизации операций сканирования и измерения. Быстродействующие средства контроля создаются на основе применения аналоговых и цифровых методов обработки многомерного сигнала, а также многоканальных акустических систем с одновременным или коммутируемым действием. В координатах амплитуда – частота – время строятся двух- и трехмерные изображения акустических полей, что дает возможность оценивать тонкую структуру отражающей поверхности.

Механизированное сканирование позволяет облегчить труд оператора, исключить ошибки, связанные с несоблюдением регламента сканирования при поиске дефектов, а в некоторых случаях даже повысить общую производительность контроля. Так же, необходимость выполнять работы на высоте и в стесненных условиях заставляют повышать мобильность аппаратуры. Так, например, дефектоскоп ISONIC utPod обладает очень высокой компактностью при соблюдении всех основных функциональных требований. Впервые оператор может держать прибор и сканировать одной рукой. Это обеспечивает повышенные надежность контроля и безопасность при работе в труднодоступных местах.

Топ-уровень ISONIC utPod обеспечивают: биполярный прямоугольный зондирующий импульс с регулируемой длительностью, амплитудой (до 300 В) и крутыми фронтами, значительно улучшающий проникновение ультразвука в различные материалы – крупно- и мелкозернистые, с большим и малым затуханием и т. д.; автоматическое измерение сигналов с учетом тригонометрических функций, толщины и кривизны объекта, оценка дефектов в соответствии с действующими стандартами. ISONIC utPod легко управляется посредством яркого сенсорного экрана высокой четкости через интуитивный пользовательский интерфейс. Благодаря широкой полосе пропускания и совершенному генератору зондирующих импульсов ISONIC utPod применим для множества задач, например, контроля сварки, поковок, литья, а также изделий из композитов, полиэтилена высокой плотности, пластиков и других материалов.

Новый универсальный ультразвуковой дефектоскоп USD-60 позволяет воспользоваться всем богатством возможностей современной цифровой техники: выводить сигнал в виде А, В, С -сканов, подключать датчик пути для построения координатной развертки изделия, записывать большой объем данных, автоматически формировать отчеты и протоколы, выводить их на печать непосредственно с прибора. Дефектоскоп УСД-60 позволяет измерять толщину изделий с высокой точностью и коррекцией V-образности, проводить ручной, автоматизированный контактный и иммерсионный (специальная и-зона) контроль, а также использовать многоканальные сканирующие системы (до 32-х каналов).

Ультразвуковой дефектоскоп УД2В-П46 с TFT-дисплеем позволяет просматривать результаты измерений как на самом приборе, так и на персональном компьютере с помощью специальной программы. Существует возможность автоматизации обработки результатов контроля, разделив их по разным базам протоколов, а также создания собственных протоколов ультразвуковой дефектоскопии с применением программы-конструктора.

Ультразвуковой дефектоскоп-томограф общего назначения УД4-76предназначен для ручного и механизированного ультразвукового контроля материалов, заготовок, изделий и оборудования, съема и сохранения томограмм. Функция томографа позволяет отображать и сохранять результаты контроля в виде Б-сканов с привязкой к пути сканирования. Дефектоскоп также решает задачу измерения толщины изделий при одностороннем доступе. Присутствует несколько режимов работы с АРД диаграммами, что позволяет мобильно определять эквивалентные размеры дефектов.

Ультразвуковой дефектоскоп УД4-76 адаптирован и полностью соответствует требованиям нормативной документации, действующей в различных производственных секторах, таких как: атомная энергетика, металлопроизводство, трубная промышленность, железнодорожный транспорт и т.д.

Дефектоскопы A1550 IntroVisor, RapidScan и Phasor XS используют преимущества получения изображения посредством фазированной решетки. Томограф A1550 IntroVisor позволяет визуализировать процесс сканирования в режиме реального времени (25 кадров в секунду).

Ультразвуковой дефектоскоп нового поколения УСД-50 IPS в специально разработанном ударопрочном корпусе имеет вход энкодера, позволяющий подключать различные сканеры для построения В-сканов и TOFD развертки контролируемого участка изделия.

Компактный дефектоскоп A1212 МАСТЕР ПРОФИ позволяет в полуавтоматическом режиме корректировать характеристики призм наклонного преобразователя вследствие его износа.

Высокой универсальностью обладает дефектоскоп USLT 2000 на базе стандартного компактного компьютера (ноутбука), бытового или промышленного исполнения.

Несмотря на все сложности проведения и необходимость тщательного соблюдения значительного числа ограничивающих факторов, ультразвуковой контроль имеет огромные перспективы и возможности совершенствования. Если бы разработчикам удалось получить лучшую визуализацию, для снижения субъективности оценки дефектов, эксперты получили бы великолепную возможность объективной оценки качества выполнения сварных соединений и основного материала строительных и инженерных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротин А. И., Лазарев А. Л., Плаксин А. А., Шмыров С. Ф. Основы ультразвуковой дефектоскопии металлических конструкций: учебное пособие. – Саранск, 2008. – 60 с.

ЛАЗАРЕВ А. Л., ШОРИН М. А., КАКУРИН И. Р.

СОЗДАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ С КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СТОЙКОСТЬ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Аннотация. Изложены основные принципы метода расчета функционально-градиентных композиционных материалов с покрытием. Приведен пример прогнозирования свойств композита с покрытием, выполненный методом расчета функционально-градиентных материалов с учетом выравнивания напряжений в прослойке.

Ключевые слова: прогнозирование свойств, расчет, функционально-градиентные композиционные материалы.

LAZAREV A. L., SHORIN M. A., KAKURIN I. R.

CREATING GRADIENT COATINGS WITH A SET OF PROPERTIES PROVIDING RESISTANCE TO OPERATIONAL IMPACTS

Abstract. The article considers the basic principles of calculation of functionally gradient coated composite materials. The authors focus on predicting the properties of a coated composite calculated by the method of functionally gradient materials with the alignment of stress in the layer.

Keywords: forecasting of properties, calculation, functional and gradient composite materials.

Современные технологии предъявляют к конструктивным материалам повышенные функциональные требования. Существует множество способов получения композитов с заданным распределением свойств. Наиболее перспективными являются слоистые композиты. Формирование слоистой структуры композитного изделия возможно различными способами – приклейка армирующего слоя с помощью клеевых составов, нанесение полимерного состава на поверхность изделия, импрегнация и т.д. [1].

Технология изготовления покрытия оказывают значительное влияние на работу изделия в процессе эксплуатации. Распределение упругих свойств по сечению основного материала и покрытия могут иметь дискретный или градиентный характер, что должно отражаться на методах расчета элементов с покрытием.

При проектировании функционально-градиентных композитов с покрытием необходимо обеспечить надежную работу композита, покрытия и промежуточного слоя [2]. Нормальные напряжения в сечении определяются выражением

$$\sigma = \frac{N_i}{F_i} + \frac{4M_i}{bh^2 \int_{-1}^1 f(\eta)\eta d\eta}, \quad (1)$$

где N_i – осевая сила в каждом составляющем стержне; M_i – внутренний момент в том же

стержне; F_i – площадь поперечного сечения i -го стержня.

С учетом формул [3]

$$\sigma_x = kx f(\eta), \quad (2)$$

$$\int_{-b}^b \sigma_x y dy = M. \quad (3)$$

внутренний момент в i -м стержне определяется из выражения

$$M_i = \frac{M^0}{\sum EJ} E_i J_i - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{E_i J_i}{\sum EJ}. \quad (4)$$

Здесь $\sum EJ$ и $E_i J_i$ рассчитываются по формулам

$$\sum EJ = (J_1 + J_2) \int_{h_2}^{h_1} E(y) dy; E_i J_i = J_i \frac{\int_0^{h_i} E(y) dy}{h_i}.$$

Предполагаем, что сдвигающие усилия развиваются в промежуточном слое, соединяющей первый и второй стержень. Модуль упругости $E_{км}$ композиционного материала [4] можно оценить по следующей формуле:

$$E_{км} = E_1 \gamma_1 + E_2 \gamma_2, \quad (5)$$

где E_1, E_2 – модули упругости структур, составляющих композит в каждом слое стержня; γ_1, γ_2 – их объемное содержание.

Учитывая неоднородность элемента по высоте поперечного сечения, принимаем h как функцию координаты η (здесь $\eta = y/h$). На основании известных величин модуля упругости вычисляем функции $f(\eta)$ распределения напряжений. В элементах, где крайние слои выполнены из материала с гораздо большим модулем упругости чем в срединной области, нормальные напряжения изменяются по высоте поперечного сечения в соответствии с графиком показательной функции $f(\eta) = k(e^\eta - 1)$.

Эффект от покрытия наблюдается лишь при его совместной работе с основным материалом, что говорит о необходимости уделять особое внимание при расчете таких конструкций возникающим в контактном слое напряжениям и отслоению покрытия. При работе изгибаемых изделий с покрытием в контактном слое возникают значительные сдвигающие напряжения. Они распределены по длине образца неравномерно и имеют максимальные значения на краях. Для того, чтобы обеспечить совместную работу элемента и покрытия, целесообразно снизить сдвигающие напряжения на краях слоя. Добиться этого можно, изменяя конструкцию соединения и свойств прослойки.

Известно, что усилия на непрерывные связи соединительного слоя, работающие на сдвиг, передаются неравномерно. Перенапряженными являются крайние участки, где возникает опасность разрушения. Устранить это обстоятельство можно путем усложнения конструкции соединения (геометрии и деформативных свойств связей).

При рассмотрении образцов с покрытием имеем случай прикрепления упругой

пластинки постоянного сечения к жесткому основанию через связующие прослойки (рис.1). Напряжения в прослойке являются функциями координат $\tau = \tau(z)$ и $\sigma = \sigma(x)$. Предполагая, что для достижения цели может потребоваться изменение по сечению толщины прослойки, зададим $h=h(x)$.

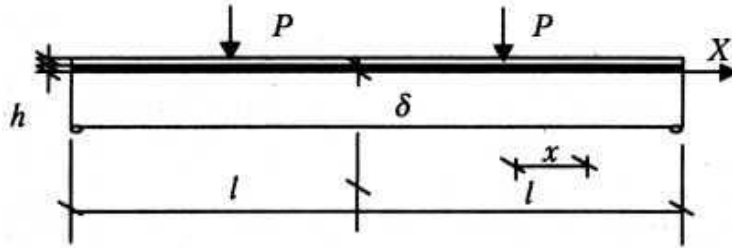


Рис. 1. Расчетная схема балки с покрытием.

При использовании безразмерных координат $\varsigma = z/l$ и $\xi = x/l$, формула для определения напряжений в конкретной точке, удаленной от начала координат на расстоянии x от ненагруженного конца, имеет вид

$$\sigma_x = \frac{l}{\delta} \int_0^x \tau(z) dz = \frac{\tau_0}{\delta} \int_0^x \left(\frac{\tau_z}{\tau_0} \right) dz = \tau_0 \frac{l}{\delta} \int_0^\xi \frac{\tau(\varsigma)}{\tau_0} d\varsigma. \quad (6)$$

Учитывая, что τ_0 – касательные напряжения в начале координат, записываем данную формулу в виде

$$\sigma_x = \tau_0 \frac{l}{\delta} J(\xi), \quad (7)$$

где $J(\xi) = \int_0^\xi \frac{\tau(\varsigma)}{\tau_0} d\varsigma$.

Относительные продольные деформации пластинки с модулем упругости E определяются как

$$\varepsilon = \varepsilon(\xi) = \frac{\sigma_x}{E} \quad (8)$$

или с учетом преобразований

$$\varepsilon = \frac{\tau_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} J(\xi). \quad (9)$$

При рассмотрении сдвиговой деформации соединительной прослойки, учитывая линейные и угловые приращения размеров составных частей соединения, при изменении величин напряжений $d\sigma$ (рис. 2) имеем

$$dx + \Delta dx = dx + (h - dh)(\gamma + d\gamma) - h\gamma,$$

откуда $\Delta dx = d(h\gamma)$ и далее

$$\varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{d(h\gamma)}{dx}. \quad (10)$$

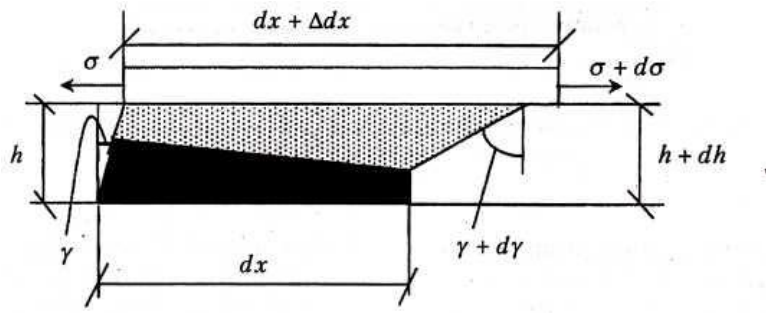


Рис. 2. Схема деформационного состояния соединительной прослойки.

Угловую деформацию прослойки γ , входящую в эти формулы, выраженную через касательные напряжения $\tau = \tau(x)$ и модуль сдвига прослойки $G = G(x)$ представим в виде отношения $\gamma = \frac{\tau_x}{G_x}$ как

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_0} \cdot \frac{\tau_x}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_x}, \quad (11)$$

где G_0 – модуль прослойки при $x=0$.

Подставляя выражение (11) в формулу (10), получаем

$$\varepsilon = \frac{\tau_0}{G_0} \cdot \frac{d}{dx} \left(h_x \cdot \frac{\tau_x}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_x} \right)$$

или после замены переменных

$$\varepsilon = \frac{\tau_0}{G_0} \cdot \frac{h_0}{l} \cdot \frac{d}{d\xi} \left(\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{\tau_\xi}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} \right). \quad (12)$$

После приравнивания правых частей (9) и (12) получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{d\xi} \left(\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{\tau_\xi}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} \right) = \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} J(\xi)$$

Интегрирование дает

$$\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{\tau_\xi}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} = \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} F(\xi) + C, \quad (13)$$

где $F(\xi) = \int J(\xi) d\xi$.

При $\xi = 0$ будем иметь $\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{\tau_\xi}{\tau_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} = 1$. Отсюда $C = 1 - \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} F(0)$.

Окончательно имеем

$$\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} = \frac{\tau_0}{\tau_\xi} \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} [F(\xi) - F(0)] \right\}. \quad (14)$$

Полагая, что $\frac{\tau(\zeta)}{\tau_0} = 1$, т.е. рассматривая случай равномерного распределения передаваемой нагрузки, имеем

$$J(\xi) = \int_0^\xi d\zeta = \xi. \quad (15)$$

Отношение $\frac{\tau(\zeta)}{\tau_0}$ определяет характер распределения напряжений сдвига $\tau(z)$ по длине прослойки. Следовательно, данное отношение можно заменить функцией $f(\zeta)$.

Задавшись целью выровняться напряжения сдвига в зоне контакта слоев, зададим функцию $f(\zeta) = 1$. В этом случае: $J(\xi) = \xi; F(\xi) = \frac{\xi^2}{2}; F(0) = 0$. Тогда закон изменения толщины и характеристики прослойки запишется как

$$\frac{h_\xi}{h_0} \cdot \frac{G_0}{G_\xi} = 1 + \frac{G_0}{2E} \cdot \frac{l}{b\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \xi^2. \quad (16)$$

Реализация подобного решения возможна исходя из технологических условий и условий эксплуатации, а также за счет изменения толщины прослойки и ее деформационных свойств. При $\frac{G_0}{G_\xi} = 1$, характер изменения толщины прослойки определяется формулой

$$\frac{h_\xi}{h_0} = f(\zeta) \cdot \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{b\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \xi^2 \right\}. \quad (17)$$

Рисунок 3 дает представление о характере изменения толщины соединительной прослойки при постоянном модуле сдвига и различных значениях отношения длины элемента к начальной толщине прослойки l/h_0 . Изменения толщины промежуточного слоя можно достичь, варьируя глубину проникания композита при нанесении покрытия. Если же решение реализуется за счет изменения свойств соединительной прослойки, то мы имеем $\frac{h_\xi}{h_0} = 1$ и характер изменения деформационных параметров будет определяться по формуле

$$\frac{G_0}{G_\xi} = \frac{1}{f(\zeta)} \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \xi^2 \right\}. \quad (18)$$

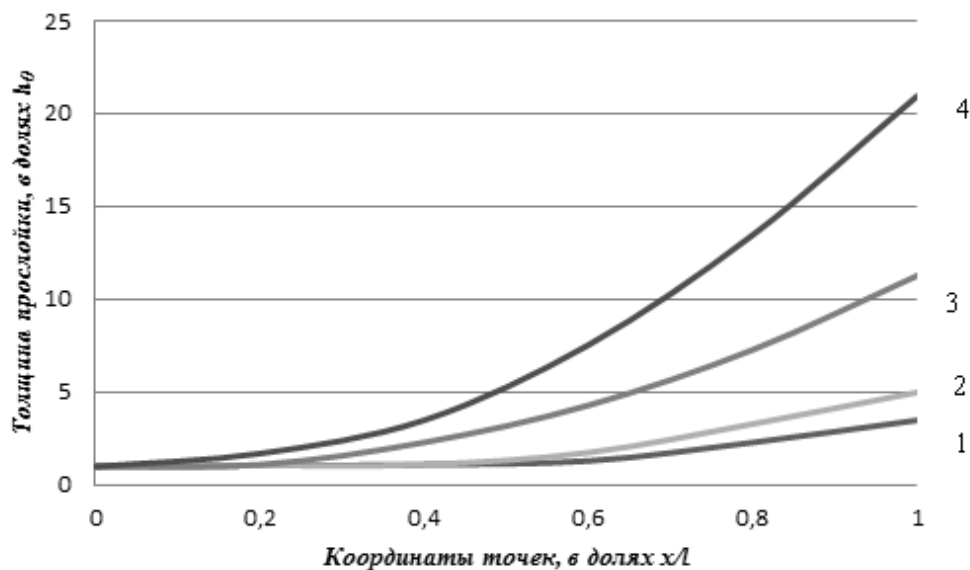


Рис. 3. Характер изменения толщины промежуточного слоя при $G = \text{const}$ и соотношениях длины элемента к начальной толщине прослойки l/h_0 : линия 1 – $l/h_0 = 1$; линия 2 – $l/h_0 = 2$; линия 3 – $l/h_0 = 5$, линия 4 – $l/h_0 = 10$.

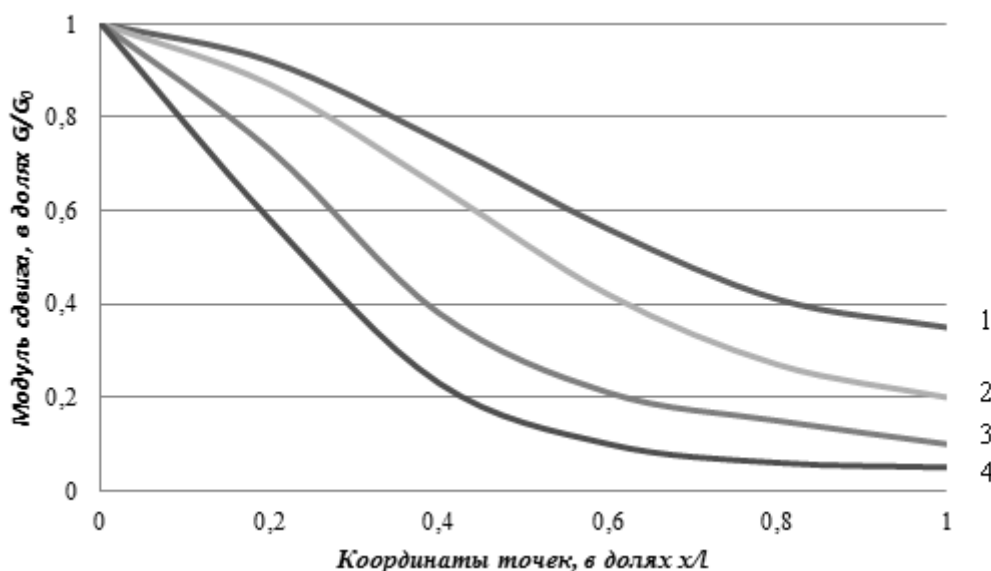


Рис. 4. Характер изменения модуля сдвига промежуточного слоя при $h = \text{const}$ и соотношениях длины элемента к начальной толщине прослойки l/h_0 : линия 1 – $l/h_0 = 1$; линия 2 – $l/h_0 = 2$; линия 3 – $l/h_0 = 5$, линия 4 – $l/h_0 = 10$.

На рисунке 4 показано изменение модуля сдвига прослойки при постоянстве ее толщины h и для разных величин отношения l/h_0 . При рассмотрении обоих случаев принимались следующие соотношения параметров промежуточного слоя: $\frac{l}{\delta} = 10$, $\frac{G_0}{E} = 0,4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
2. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
3. Какурин И. Р., Киселев А. Н., Лазарев А. Л., Шорин М. А. Практическое применение методов проектирования характеристик элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – Спецвыпуск. - <http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskoe-primenenie-metodov-proektirovaniya-kharakteristik-ehlementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov>.
4. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.

КАМАЛЯН Р. С., КУПРИЯШКИНА Е. И., КУПРИЯШКИНА Л. И.
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Аннотация. В работе изучена возможность создания новых теплоизоляционных материалов. Рассмотрена модификация диатомита, который используется в качестве наполнителя для получения вакуумированных плит. Определены оптимальные режимы модификации.

Ключевые слова: теплоизоляционные свойства, вакуумированная панель, модификация, наполнитель, энергоэффективность, диатомит, осадок, структура.

KAMALYAN R. S., KUPRIYASHKINA E. I., KUPRIYASHKINA L. I.
THERMAL INSULATING MATERIALS OF NEW GENERATION

Abstract. The article studies the possibility of new insulating materials development. The study considers a modification of diatomite used as a filler in order to obtain vacuum panels. The optimal conditions of modification are specified.

Keywords: thermal insulation properties, vacuum panel, modification, filler, energy efficiency, diatomite, sediment, structure.

В 2013 году разработана и утверждена Государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Республике Мордовия» на 2014–2020 годы с общим объемом финансирования 4 606,2 миллиона рублей. Одним из базовых документов для этой программы стал Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Сегодня идет активный поиск прорывных возможностей, связанных с энергоэффективностью применительно к строительной отрасли. Мероприятия по энергосбережению могут быть разными. Один из самых действенных способов увеличения энергоэффективности зданий – применение современных технологий энергосбережения, что подразумевает так же сознание новых эффективных теплоизоляционных материалов нового поколения.

В России необходимо значительно увеличить объемы производства теплоизоляционных материалов, расширить их ассортимент, улучшить качество и повысить долговечность. Традиционным для России «теплым материалом» является древесина, однако она недолговечна: горит, гниет, подвержена биодegradации. Теплоизоляция на основе синтетических материалов дешевле, легче, теплее, но она горит, выделяет вредные газы,

нарушает экологию жизненного пространства. Поэтому в последние годы активно ведутся разработки по созданию эффективных теплоизоляционных материалов нового поколения на основе минеральных порошков, вакуумированных в специальных пакетах [1].

Германия, Япония, США, Китай уже разработали, производят и применяют в строительной отрасли вакуумированные теплоизоляционные панели, форма и геометрия которых обеспечиваются минеральным порошком, играющим роль наполнителей. Теплоизоляционные панели имеют коэффициент теплопроводности в диапазоне $0,002 \div 0,02$ Вт/(м·К), который на порядок ниже, чем у пенополистирола или пенополиуретана. Производство вакуумных изоляционных панелей освоено в Западной Европе. Предприятия Германии выпускают несколько видов теплоизоляционных панелей типа VIP. Особая роль в технологии производства вакуумных теплоизоляционных панелей отводится наполнителям, которые в данном случае являются многофункциональными и поликомпонентными.

Исходя из функциональных требований, наполнитель должен обеспечивать стабильные теплозащитные свойства VIP на весь нормативный или расчетный срок эксплуатации. Для этого, согласно экспериментальным данным, наполнитель должен иметь следующие характеристики: пористость в состоянии свободной засыпки выше 92%; крупность частиц менее 0,2 мм с высокой степенью однородности; координационное число в пределах $2 \div 4$, фрактальная размерность неоднородностей поверхности зерен наполнителя – в пределах 2,4–2,7; элементный состав более чем на 90% должен состоять из оксидов кремния.

В то же время многокомпонентный наполнитель должен: обеспечивать заданную форму при изготовлении и в процессе эксплуатации; воспринимать значительное внешнее давление; обеспечивать возможность управления созданием многоуровневой поровой структуры наноразмерного уровня. Поэтому рассматривалась возможность применения при производстве вакуумных теплоизоляционных панелей дисперсных порошков из природных диатомитов. Особенности поровой структуры и морфологии поверхностей, составляющих диатомиты и порошок FRONT-VIP частиц микрометровых размеров, исследовались на многофункциональном электронном микроскопе Quanta 200 i3D. На рис. 1 представлена микрофотография фрагмента панциря створок диатомовых водорослей, причем кремнистые остатки могут иметь весьма разнообразную форму, а размеры поровых каналов лежат в пределах 0,4–2,6 мкм [2].

Определение и оценку структурных характеристик дисперсных порошков выполнили методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). Были исследованы особенности структурных неоднородностей природного диатомита Атемарского месторождения, а также

порошка-наполнителя вакуумной изоляционной панели FRONT-VIP компании VACU – ISOTECKG. Характер кривых $I(s)$ свидетельствует о том, что исследованные материалы содержат в своем составе рассеивающие неоднородности (поры) разных линейных размеров, а высокие значения интенсивности рассеяния обусловлены резким контрастом, вызванным большой разницей между плотностью кремнеземных частиц и порами. На рис. 2 показаны экспериментальные кривые МУРР природного диатомита Атемарского месторождения и порошка-наполнителя изоляционной панели FRONT-VIP.

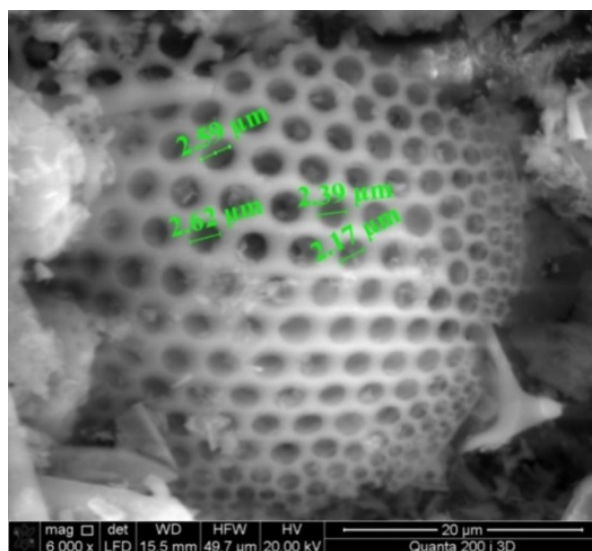


Рис.1. Микрофотография фрагмента панциря диатомовой водоросли.

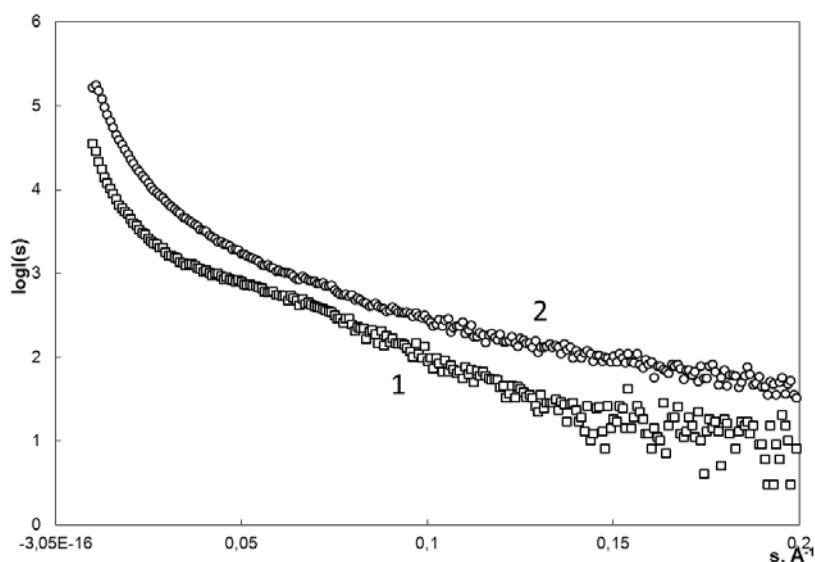


Рис. 2. Кривые малоуглового рентгеновского рассеяния дисперсных порошков:
1 – природного диатомита; 2 – порошка-наполнителя FRONT-VIP.

На кривой МУРР диатомита Атемарского месторождения выделяются три прямолинейных участка, соответствующих значениям вектора рассеяния: $0,013 \div 0,026$; $0,031 \div 0,061$ и $0,067 \div 0,095 \text{ \AA}^{-1}$. Параметр α для этих участков 2,59, 1,56 и 3,73; размеры неоднородностей, соответственно, $24 \div 48$, $10 \div 20$ и $7 \div 9$ нм. Наиболее крупномасштабные рассеивающие объекты ведут себя как массовые фракталы с фрактальной размерностью $D = \alpha = 2,59$, что характерно для разветвленных самоорганизованных пористых структур. Второй прямолинейный участок индикатрисы $\lg I(s) - \lg s$ соответствует неоднородностям с фрактальной размерностью $D = 1,56$, которые могут представлять собой кластеры в виде изогнутых цепочек сферических пор нано- и микрометрового масштаба, возможно, поровые каналы. Кроме массовых фракталов в природном диатомите Атемарского месторождения наблюдаются неоднородности с фрактальной поверхностью раздела. Размеры таких неоднородностей $7 \div 9$ нм, а фрактальная размерность – $D_s = 6 - \alpha = 2,27$. Такое значение фрактальной размерности соответствует несильно изрезанной поверхности, если учесть, что совершенно гладкая поверхность имеет $D_s = 2,0$, а сильно изрезанная пористая поверхность – 3,0. Результаты дают основания считать, что изученные зернистые системы пригодны: для создания теплоизоляционных материалов нового поколения; в качестве наполнителей вакуумных изоляционных панелей.

Однако для получения наполнителя с перечисленными выше характеристиками для вакуумированных панелей диатомит в чистом виде не приемлем, необходима его модификация. Для проведения эксперимента была использована математическая модель процессов – двухфакторной план (метод Коно), где варьировались следующие факторы: X_2 – концентрация щелочи для обработки диатомита (10, 20, 30%), X_1 – температура обработки (50, 70, 90°C). Были получены полиномиальные уравнения, описывающие оптимальные режимы модификации. Анализ полученных экспериментальных данных показал (рис. 3), что наибольший выход модифицированного продукта получен при обработке диатомита 30 % раствором щелочи при температуре 90 °C. Рентгеноструктурный анализ позволил выявить наибольшее содержание чистого оксида кремния в модифицированном диатомите, что составило 98,98%. Такое количество оксида кремния было получено при обработке диатомита 10% раствором щелочи при температуре 50 °C.

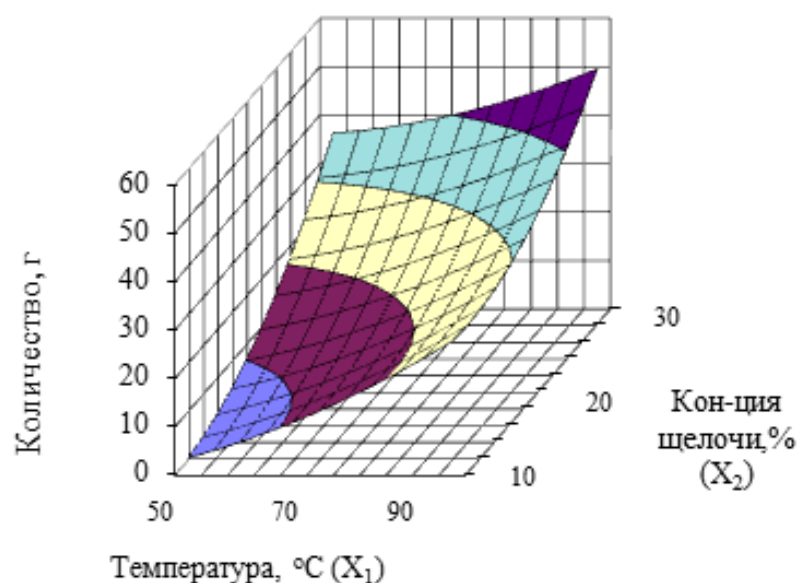


Рис. 3. Оптимизация режимов получения модифицированного диатомита.

Сырьевой базой для получения кремнезёма в республике Мордовия могут служить два месторождения диатомита – Атемарское и Анучинское с суммарными запасами 21 106 тыс.м³. По результатам проведенных исследований был разработан и запатентован способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезёма (патент на изобретение РФ №2526454), который можно использовать в качестве наполнителя вакуумированных панелей [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Осипов А. К., Неверов В. А., Куприяшкина Л. И., Маштаев О. Г., Сидоров В. В. Теплоизоляционные свойства материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков // Строительные материалы. – 2013. – № 1. – С. 61–63.
2. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита: монография / В. П. Селяев, В. А. Осипов, Л. И. Куприяшкина [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 220 с.
3. Пат. № 2526454 Российская федерация, МПК С1. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема / В. П. Селяев, А. К. Осипов, А. А. Седова, Л. И. Куприяшкина; Заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарева. – № 2013104054; заявл. 30.01.13; опубл. 30.06.14.

ИНИН А. Е., НИЗИНА Т. А., МИХАЙЛОВА В. М.

**РАЗРАБОТКА ЖИДКИХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ**

Аннотация. Приведены результаты исследования разработанных составов жидких теплоизоляционных покрытий, обладающих высокими теплоизоляционными характеристиками. Показана эффективность применения в составах местных минеральных наполнителей.

Ключевые слова: теплоизоляционное покрытие, акриловое связующее, местный минеральный наполнитель, диатомит, белая сажа.

ININ A. E., NIZINA T. A., MIKHAILOV V. M.

**DEVELOPING OF LIQUID ENERGY-SAVING COVERS
BASED ON LOCAL MINERAL FILLERS**

Abstract. The article shows the test results of the new-developed compositions of liquid thermal insulation coatings with high operational characteristics. The study demonstrates the effectiveness of local mineral fillers.

Keywords: thermal insulation coating, acrylic binder, local mineral filler, diatomite, white soot.

Энергосбережение является важнейшей задачей современности. Актуальность этой проблемы в Российской Федерации обусловлена, в первую очередь, весьма низкой среднегодовой температурой окружающей среды ($-5,5^{\circ}\text{C}$), значительной длительностью отопительного сезона (в целом ряде регионов РФ этот показатель превышает 200 дней, а в отдельных регионах отопление зданий и сооружений осуществляется постоянно), а также наличием большого числа морально и физически устаревшего оборудования. Масштабность этой проблемы для нашей страны характеризуется следующими показателями. Длина тепловодов систем теплоснабжения страны составляет 260 тыс. км; из них порядка 60 тыс. км находятся в аварийном состоянии. Потери тепла при транспортировке достигают 80 млн. т. у. т. в год при общем расходе на теплоснабжение 400 млн. т. у. т. в год. Ежегодные потери энергоресурсов в нашей стране сравнимы с годовым энергопотреблением промышленно развитых европейских государств [1].

ЖКХ является одним из крупнейших потребителей энергии. Потребление систем теплоснабжения только гражданских зданий составляет 30% всего добываемого в стране твердого и газообразного топлива, при этом потери тепловой энергии достигают 50-60% [2]. При этом с годами становится все более очевидно, что проблему энергосбережения

возможно решить не только за счет увеличения добычи энергоресурсов в труднодоступных районах и строительством новых энергообъектов, но и непосредственно за счет снижения потребления энергоресурсов.

На сегодняшний день среди традиционных утеплителей наибольшее распространение получили минеральная вата и пенополистирол. Однако данные материалы обладают рядом недостатков:

- они малоэффективны при утеплении поверхностей сложных конфигураций;
- не обеспечивают полного отсутствия мостиков холода;
- при их использовании на металлических конструкциях возникает необходимость в дополнительном применении антикоррозионных материалов.

Наиболее эффективный путь экономии топливно-энергетических ресурсов в жилищно-строительной сфере – создание энергоэффективных жидких теплоизоляционных покрытий (ЖТП) на основе полимерных связующих, обладающих рядом преимуществ по сравнению с традиционными утеплителями. ЖТП защищают конструкции от коррозии и перегревов, препятствуют образованию плесени и грибка, имеют более продолжительный срок службы; позволяют производить теплоизоляцию в труднодоступных местах; существенно снижают затраты труда при производстве работ и т.д. Использование при разработке составов ЖТП минеральных наполнителей позволяет снизить себестоимость производимой продукции без потери эксплуатационных показателей, что, несомненно, является востребованной и актуальной задачей.

Среди составов жидкой теплоизоляции наибольшее применение нашли следующие торговые марки:

- Изоллат – ООО «Специальные технологии», г. Екатеринбург;
- Корунд – ООО «Фуллерены», г. Волгоград;
- Thermal-Coat TM – США.

Как правило, низкие значения коэффициента теплопроводности жидких теплоизоляционных покрытий обеспечиваются за счет введения в их состав максимального количества полых керамических и стеклянных микросфер, содержание которых достигает 80% от общего объема. Однако использование достаточно дорогих микросфер приводит к существенному повышению себестоимости и, как следствие, снижению конкурентной способности выпускаемой продукции.

Основным недостатком наиболее хорошо зарекомендовавших себя покрытий является высокая цена, существенным образом зависящая от стоимости используемых микросфер. Кроме того, в настоящее время выпускается целый ряд составов, также предлагаемых в качестве теплоизоляционных покрытий. Однако стремление снизить цену лишь за счет

использования микросфер более низкого качества приводит к существенному ухудшению эксплуатационных характеристик, а в ряде случаев и к многочисленным нареканиям со стороны конечных производителей.

Решение задачи снижения расхода микросфер без потери эксплуатационных характеристик возможно за счет использования модифицированных связующих, содержащих тонкодисперсные минеральные наполнители. Известно, что тонкодисперсные минеральные порошки обладают высокой пористостью, что позволяет создавать на их основе эффективные теплоизоляционные материалы [3]. Поэтому использование ультра- и наноразмерных частиц кремнезема (в том числе, полученных из диатомита Атемарского месторождения Республики Мордовия), позволяет существенно снизить расход микросфер и разработать эффективные составы ЖТП.

Жидкие теплоизоляционные покрытия представляет собой суспензию белого или любого другого цвета, которая после высыхания образует бесшовное покрытие толщиной, как правило, 2÷4 мм, обладающее высокими теплоизоляционными, звукоизоляционными и антикоррозионными свойствами. Жидкая теплоизоляция наносится послойно окрасочными инструментами: кисточкой, валиком или краскопультом низкого давления. Работы по нанесению покрытия сопоставимы с трудоёмкостью покраски.

Одним из самых перспективных направлений использования жидких теплоизоляционных покрытий является применение их при теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей. Использование ЖТП обеспечивает постоянный доступ к осмотру теплоизолируемой поверхности, препятствует образованию плесени и грибка, существенно снижает затраты труда, позволяя снизить теплопотери и обеспечить антикоррозионную защиту.

Многие производители и разработчики жидких теплоизоляционных составов считают, что низкие значения коэффициентов теплопроводности подобных материалов обеспечиваются исключительно за счет введения полых керамических или стеклянных микросфер. При этом роль связующего в реализации задачи дополнительного снижения теплопроводности составов практически не учитывается.

На наш взгляд, при разработке составов жидких теплоизоляционных покрытий необходимо уделять особое внимание оптимизации составов связующих не только по прочностным и адгезионным характеристикам, но по параметрам теплопроводности. При разработке составов связующих, предназначенных в дальнейшем для изготовления ЖТП, целесообразно использовать минеральные порошки низкой плотности, что позволит дополнительно снизить теплопроводность наносимых покрытий.

На основе проведенных научно-исследовательских работ установлено, что возможно дополнительное снижение теплопроводности за счет оптимизации составов связующих и использования минеральных наполнителей, обладающих низкой плотностью. Проведенный анализ показал, что наиболее перспективными наполнителями с этой точки зрения являются белая сажа и порошки на основе диатомитов, являющиеся для Республики Мордовия местными строительными материалами.

Важнейшим свойством связующего, используемого для производства ЖТП, является его теплопроводность. Известно, что лучший теплоизолятор – это сухой воздух (коэффициент теплопроводности – $0,023 \text{ Вт/(м·К)}$), особенно когда он заключен в порах материала, т. е. малоподвижен. Если поры крупные и, тем более, сообщающиеся между собой и внешней средой, то происходит конвекционное передвижение воздуха и теплопроводность материала увеличивается.

Тонкодисперсные минеральные порошки обладают высокой пористостью, что позволяет создавать на их основе эффективные теплоизоляционные материалы [3]. Диатомиты благодаря тонкодисперсному составу, высокому содержанию кремнезема, малому удельному весу и большой удельной поверхности обладают отличными теплоизоляционными, абразивными, кислотоустойчивыми и огнеупорными свойствами.

Проведенные исследования структурных характеристик природных диатомитов месторождений Среднего Поволжья показали, что диатомиты Атемарского месторождения содержат несколько большее количество диоксида кремния, чем другие диатомиты и примерно на 2% меньше оксида алюминия, что свидетельствует о незначительном содержании в нем глинистых минералов [3].

Для подтверждения возможности повышения эксплуатационных характеристик ЖТП были проведены экспериментальные исследования, основными варьируемыми факторами в котором являлись: акриловая дисперсия, диатомит, белая сажа, стеклянные микросферы марки K15 компании «ЗМ Компании» и ряд целевых добавок.

В ходе экспериментального исследования оценивались: плотность в жидком и сухом состоянии, теплопроводность (ГОСТ 7076-99), адгезионная прочность к бетонным основаниям (ГОСТ 28574-90) и массовая доля нелетучих веществ (ГОСТ Р 52487-2005). Теплопроводность ЖТП определяли с помощью прибора ИТС-1 на основе метода стационарных потоков.

Поиск оптимальных решений осуществлялся на основе методов скаляризации и экспериментально-статистического моделирования, опирающегося на концепцию полей свойств материалов. Оптимизация составов осуществлялась с целью достижения

минимальных характеристик по теплопроводности, плотности в сухом и жидком состояниях при обеспечении достаточных адгезионных характеристик.

На основе полученных данных экспериментально доказано (рис. 1), что оптимизация составов ЖТП позволяет снизить теплопроводность покрытий до $0,05 \text{ В}/(\text{м} \times \text{К})$, что сопоставимо с аналогичными показателями для ЖТП «Корунд» ($0,0546 \text{ В}/(\text{м} \times \text{К})$) и ниже, чем для ЖТП «Изоллат» ($0,0713 \text{ В}/(\text{м} \times \text{К})$). Исследование адгезионных характеристик ЖТП показало, что наибольшей адгезионной прочностью обладают составы с содержанием: 24% акриловой дисперсии, 5% доломита и $2 \div 6\%$ белой сажи.

На основе проведенного экспериментального исследования разработаны составы ЖТП, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, не уступающими, а порой и превосходящими составы, принятые при проведении сравнительных испытаний за эталоны [4–8]. Разработана технологическая схема производственного процесса.

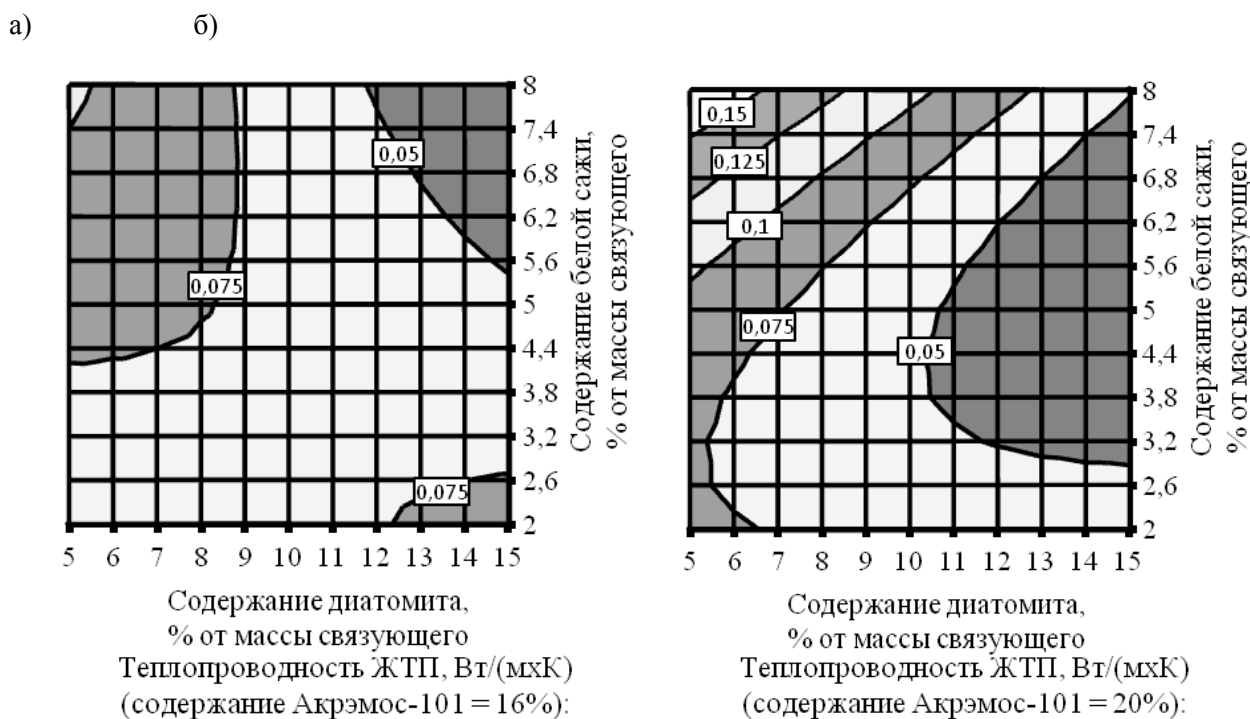


Рис. 1. Изолинии изменения теплопроводности ЖТП в зависимости от содержания диатомита, белой сажи и акриловой дисперсии: а – 16%; б – 20%.

Основными техническими параметрами, подтверждающими конкурентоспособность разрабатываемых жидких теплоизоляционных покрытий, являются:

- плотность в жидком состоянии – не более $0,5 \text{ кг}/\text{см}^3$;
- плотность в твердом состоянии – не более $0,3 \text{ кг}/\text{см}^3$;
- адгезия покрытия (по силе отрыва):
 - к бетонной поверхности – не менее 1 Мпа;
 - к кирпичной поверхности – не менее 1.5 Мпа;

- к стали – не менее 1 МПа;
- теплопроводность (по ГОСТ 7076-99) – не более 0,05 Вт/(м×К).

Для внедрения разработанных составов в производство требуется проведение экспериментальных исследований на длительное воздействие повышенных температур (для труб теплоснабжения) и натуральных климатических факторов (для фасадных, кровельных и т.д. покрытий).

Основные области применения результатов исследований:

- теплоэнергетика и промышленность (котлы, трубопроводы, резервуары для хранения нефтепродуктов, бойлеры, холодильное оборудование, компрессорное оборудование и т.д.);
- строительство и ЖКХ (стеновые конструкции, кровли, лоджии, торцы монолитных плит, чердачные перекрытия и т.д.);
- транспорт (рефрижераторы, пассажирский транспорт, железнодорожные вагоны, морские и речные суда, авиатранспорт и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Логинова Н. А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 20 с.
2. Береговой А. М., Викторова О. Л., Береговой В. А. Энергосбережение в жилых зданиях с альтернативными источниками энергии // Строительные материалы. – 2008. – № 5. – С. 34–38.
3. Селяев В. П., Осипов А. К., Неверов В. А., Маштаев О. Г., Сидоров В. В. Полиструктурная модель теплоизоляционного материала на основе дисперсного микрокремнезема // Региональная архитектура и строительство. – № 2(13). – С. 5–11.
4. Инин А. Е., Низина Т. А. Энергосберегающие защитные покрытия на основе полых микросфер // Актуальные вопросы строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 170–173.
5. Инин А. Е., Низина Т. А., Неверов В. А. Разработка жидких теплоизоляционных покрытий с использованием местного минерального сырья // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Тула, 2013. – С. 40–41.
6. Инин А. Е., Низина Т. А., Неверов В. А. Разработка эффективных составов, наполненных полимерных связующих для жидких теплоизоляционных покрытий // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и

строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 158–162.

7. Низина Т. А., Инин А. Е. Разработка жидких энергосберегающих покрытий на основе местных минеральных наполнителей // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций факторов: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 89–94.
8. Низина Т. А., Инин А. Е., Михайлова В. М. Разработка жидких теплоизоляционных покрытий на основе местных минеральных наполнителей // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2014. – С. 67–71.

АНТОШКИН В. Д., КОНОВАЛОВ А. Г.

СБОРНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ ИЗ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Аннотация. Рассмотрены вопросы конструктивно-технологического формообразования сферических оболочек на основе геодезической сети. Исследовано несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере, которые были названы «Транер». В каждой из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

Ключевые слова: сборная сферическая оболочка, конструктивно-технологическая форма, панель, правильный шестиугольник, разрезка, купол.

ANTOSHKIN V. D., KONOVALOV A. G.

PREFABRICATED SPHERICAL SHELL OF HEXAGONAL PANELS

Abstract. The article deals with the problems of constructional and technological forming of spherical shells based on geodetic network. In this connection, several design and technological methods of constructing triangular spherical networks called "Traner" were investigated. The optimal criterion of the methods is the minimum number of standard sizes of structural components and the minimal number of dome components as well as pre-assembly and pre-tension capability.

Keywords: prefabricated spherical shell, constructional and technological form, panel, regular hexagon, cutting, dome.

Во всех конструктивных решениях куполов просматривается тенденция применения уже на стадии разрезки и формообразования этих покрытий эффективных технологических решений изготовления отдельных элементов, стендовой укрупнительной сборки сегментов куполов, возведения их с обеспечением заданной точности монтажа покрытия, в целом, или основных его несущих конструкций. Учитывая, что не все возможности разбиения сферы на панели или стержни еще исчерпаны и то, что преобладающее количество сетчатых куполов построено на сфере, проанализируем решения сборных сферических куполов из шестиугольных панелей, исходя из построений на сфере треугольной сети [1; 2].

Оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена и решена размещением правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, например, в сферических секторах, показанных на рисунках 1 и 2. Кроме перечисленных вариантов применения свойств симметрии главных линий-окружностей сферы, в подобных

разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей. Использование указанных окружностей для построения геометрической сети из треугольников и шестиугольников позволяет на 5-30% снизить число типоразмеров монтажных элементов купола, получить при необходимости плоские шестиугольные панели, а также воспользоваться конструктивными преимуществами предварительного напряжения.

Нами предложены и исследованы несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере с шестиугольными монтажными панелями, которые названы системой «Транер» [3; 4]. В каждой из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

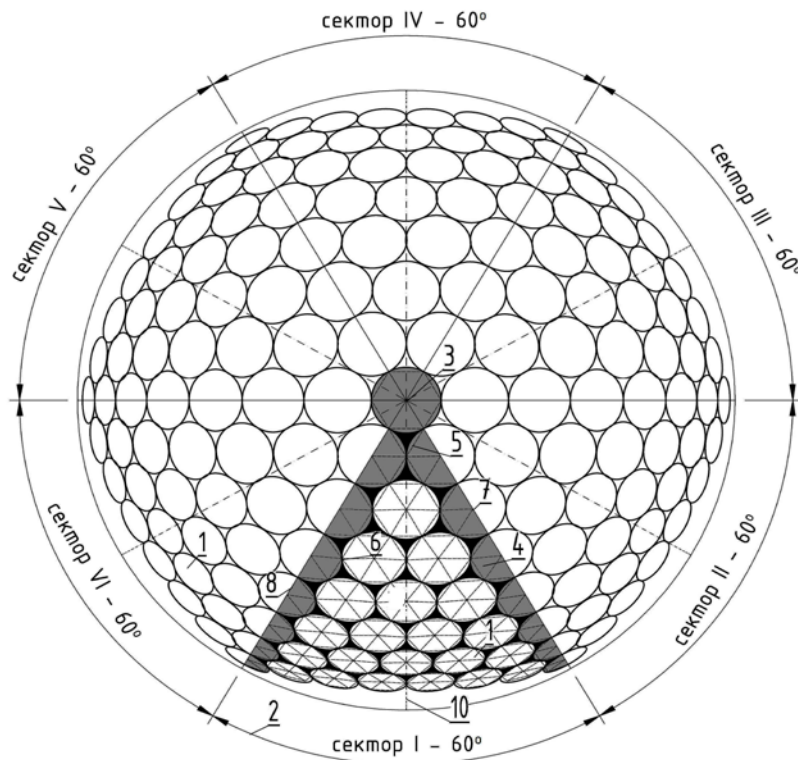
Суть предложенных вариантов разрезов «Транер» заключается в том, что сборная сферическая оболочка составляется из монтажных шестиугольных панелей, разнотипные марки которых одинаковым образом полностью или частично расположены в пределах секторов, имеющих общую вершину сферы на панели, выполненной в виде правильного шестиугольника. Панели в виде правильных и неправильных шестиугольников могут иметь убывающие размеры от центральной панели к периферии. Но панели в виде правильных шестиугольников могут иметь и одинаковые размеры панелей, расположенных по границам секторов, которые являются осями симметрии сферы.

Для первого варианта решений в пределах секторов, составляющих 60° , в сборных сферических оболочках шестиугольные панели выполнены с углами, описанными окружностями со своими радиусами из центров панелей, лежащих на сфере. Между шестиугольными панелями расположены треугольные панели (несущие или ненесущие); углы шестиугольных панелей описаны своими радиусами из центров панелей, смежные шестиугольные панели соединены между собой в точках пересечения и в точках касания окружностей, описывающих панели. Панели, смежные с шестиугольной панелью на вершине купола, выполнены одного радиуса и также в виде правильных шестиугольников. Шестиугольные панели могут быть выполнены также в свою очередь из треугольных панелей с узлом соединения в центре шестиугольной панели (центре окружности, в которую они вписаны). На рисунках 1 (а) и (б) изображен, соответственно, вид сверху и сбоку сборной сферической оболочки с шестью секторами в плане, составляющими 60° .

Во втором варианте для секторов, составляющих 120° , на вершине сферы расположена панель, выполненная в виде правильного треугольника, а смежные с центральной треугольной панелью правильные шестиугольные панели вписаны в окружности одного радиуса. Панели с центрами, расположенными по границам секторов,

выполнены в виде правильных шестиугольников либо с одинаковыми, либо с убывающими от вершины к периферии радиусами.

а)



б)

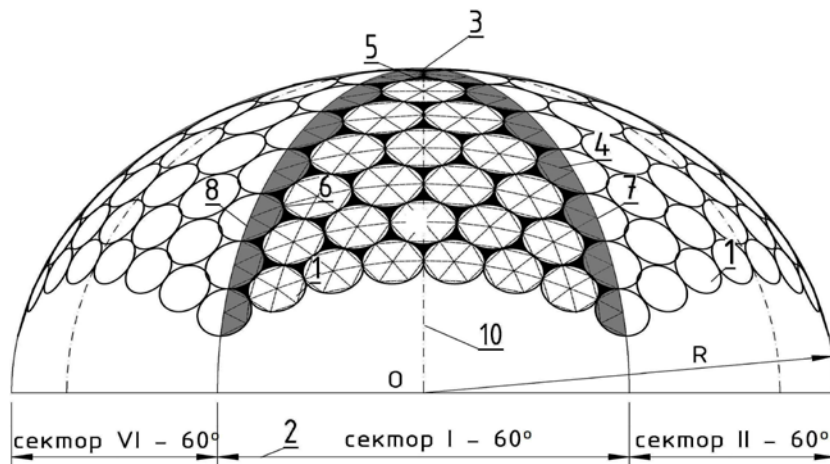
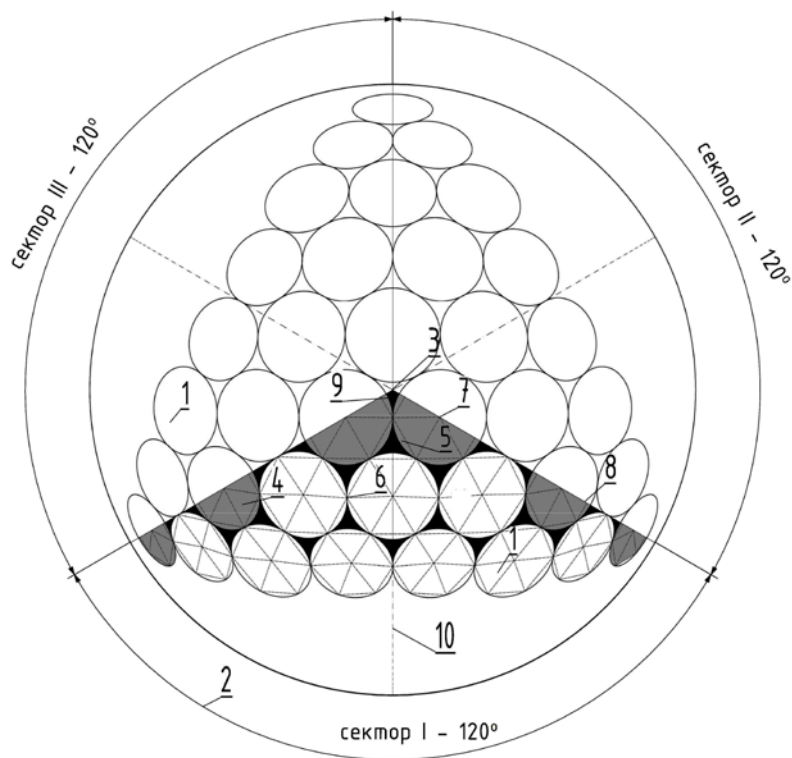


Рис. 1. Схема сборной сферической оболочки из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними:
а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – панели в виде плоских шестиугольников; 2 – сектора;
3 – панель на вершине купола в виде правильного плоского шестиугольника;
4 – панели в виде правильных шестиугольных панелей (выделены серым цветом);
5 – панели в виде треугольника; 6 – узлы соединения шестиугольных панелей;
7 – центры шестиугольных панелей; 8 – границы секторов;
9 – остаточная треугольная панель; 10 – ось сектора

На рисунке 2 (а) показан вид сверху сборной сферической оболочки с тремя секторами в плане, составляющими 120° ; на рисунке 2 (б) – вид сбоку сборной сферической оболочки с тремя секторами в плане, составляющими 120° .

а)



б)

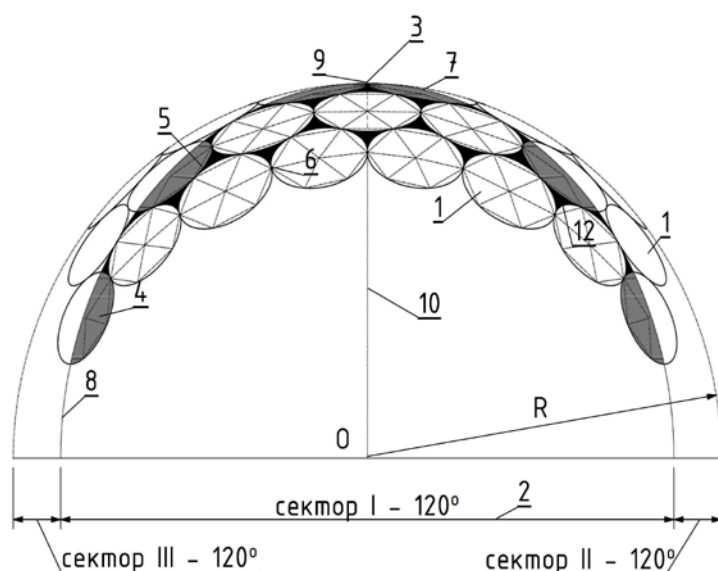


Рис. 2. Схема сборной сферической оболочки из 3-х секторов с углами на вершине 120° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними:

а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – панели в виде плоских шестиугольников; 2 – сектора;

3 – панель на вершине купола в виде правильного плоского треугольника; 4 – панели в виде правильных шестиугольных панелей (выделены серым цветом); 5 – панели в виде треугольника; 6 – узлы соединения шестиугольных панелей; 7 – центры шестиугольных панелей; 8 – границы секторов; 9 – остаточная треугольная панель; 10 – ось сектора.

На рисунке 3 показаны схемы распределения окружностей, описывающих шестиугольники, в сегментах $90 \div 90-2r$ и $90+r \div 90+r-2r$ относительно линии экватора 2 сферы и относительно главной окружности «зенит-надир».

Распределение окружностей на сфере по данным схемам представляет теоретическую основу размещения максимального числа окружностей одного радиуса с учетом касания попарно трех смежных окружностей и образования между ними треугольника. На схемах рисунка 3 показано, как с помощью этих сегментов можно разместить окружности в секторе под наклоном 60° к экватору или под наклоном 30° к экватору.

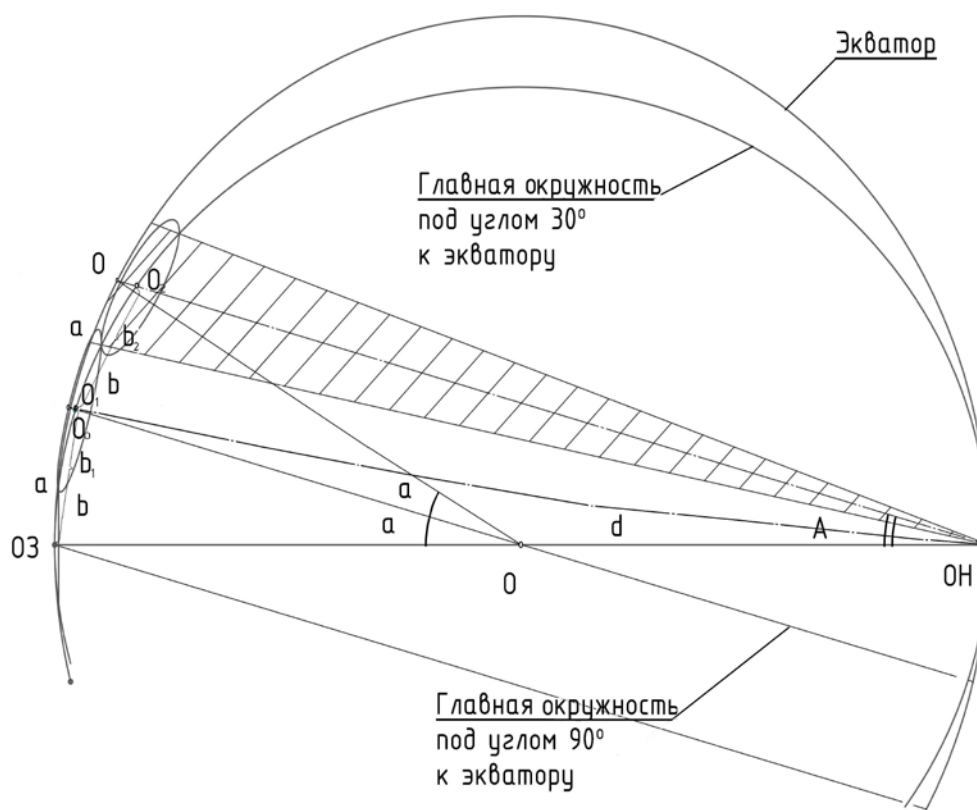


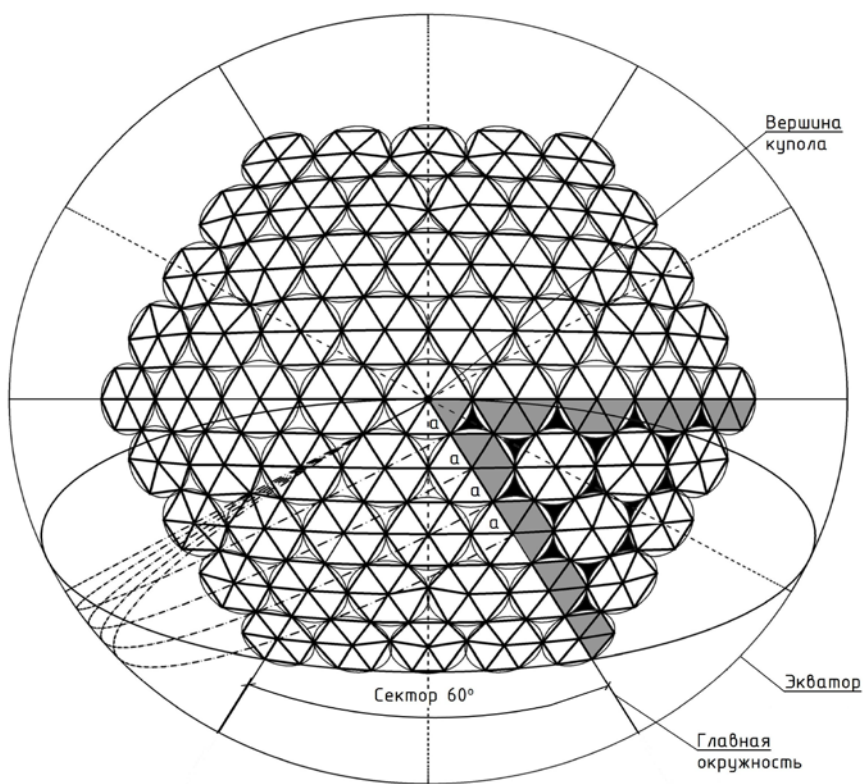
Рис. 3. Схемы распределения окружностей, описывающих шестиугольники.

При разработке алгоритма геометрического расчета разрезов, предлагаемых конструктивно-технологических систем, воспользуемся также повторяемостью параметров сети на любом сферическом треугольнике и, соответственно, на любом совместимом сферическом треугольнике или в сферическом секторе. При решении указанной проблемы предложены автоматизированные средства в системах AutoCAD и LIRA 9.4, дополненные специальными программными элементами.

Для применения методов расчета с помощью сферической тригонометрии воспользуемся зависимостями на плоскости диаметра окружности сферы, вписанных в них многоугольников и радиусов. С учетом ограничений, которые дают разрезы на основе секторов 60° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрезку на сфере с пятью рядами окружностей (см. рис. 4), состоящую из монтажных только

шестиугольных панелей девяти типоразмеров или из пяти правильных шестиугольных панелей, четырех неправильных шестиугольных панелей и двенадцати треугольных панелей-вставок (для стержней – всего 33-х типоразмеров).

а)



б)

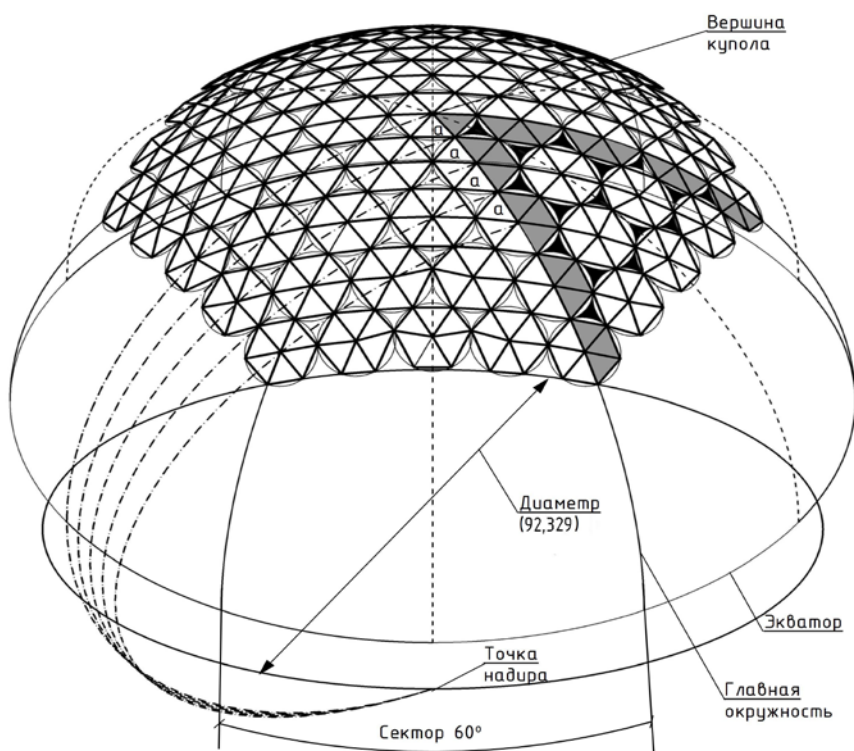


Рис. 4. Схема сборной сферической оболочки диаметром 100 м (60 м между опорами) из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними.

Опорный контур сборной оболочки выполняется в виде шести арок радиусом 46,1645 м (рис. 4б), выполненных по окружностям, проходящим через точку «надир» и углы опорных шестиугольных панелей. Координаты оболочки (рис. 4а, б) диаметром 100 м наиболее эффективной разрезки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты узлов части сетчатого купола для диаметра 100 м

№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)	№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	37	-13.3222118	7.691582438	-2.42523535
2	-4.53831182	-2.620195575	-0.27537524	38	-17.5121127	5.05923327	-3.44111178
3	0.000000061	-5.240391054	-0.27537516	39	-17.5603732	-0.00000007	-3.1851166
4	4.538311829	-2.620195554	-0.2753753	40	-17.5121127	-5.059233452	-3.44111164
5	4.538311814	2.620195565	-0.27537537	41	-17.4164916	-10.05541621	-4.22277363
6	-1.25E-08	5.2403911	-0.27537538	42	-13.1374809	-12.63631789	-3.44111156
7	-4.53831183	2.620195544	-0.27537531	43	-8.78018653	-15.20772931	-3.18511645
8	-8.97904907	-0.000000007	-0.81284025	44	-4.37463168	-17.69555122	-3.44111156
9	-8.97865142	-5.183826871	-1.08669126	45	0.000000078	-20.11083224	-4.22277362
10	-4.48952453	-7.776084615	-0.81284017	46	4.374631753	-17.69555118	-3.44111163
11	0.000000009	-10.36765366	-1.08669126	47	8.780186597	-15.20772925	-3.18511659
12	4.489524525	-7.77608461	-0.81284024	48	13.13748097	-12.6363178	-3.44111176
13	8.978651435	-5.183826824	-1.0866914	49	17.41649156	-10.05541609	-4.22277389
14	8.979049062	-1.55E-08	-0.81284038	50	17.51211268	-5.05923336	-3.4411119
15	8.978651426	5.183826803	-1.08669154	51	17.56037311	-1.35E-08	-3.18511686
16	4.489524543	7.77608457	-0.81284045	52	17.51211265	5.059233361	-3.44111204
17	-2.95E-08	10.36765362	-1.08669154	53	17.41649149	10.05541609	-4.22277417
18	-4.4895246	7.776084549	-0.81284039	54	13.13748092	12.63631775	-3.44111211
19	-8.97865147	5.183826758	-1.08669141	55	8.780186541	15.20772918	-3.185117
20	-13.370999	2.535693466	-1.88777027	56	4.374631688	17.6955511	-3.44111211
21	-13.370999	-2.535693585	-1.8877702	57	-9.9E-08	20.11083212	-4.22277418
22	-13.3222117	-7.69158262	-2.42523514	58	-4.37463183	17.69555108	-3.44111205
23	-8.88147449	-10.31177814	-1.88777013	59	-8.78018667	15.20772914	-3.18511688
24	-4.48952446	-12.84747165	-1.88777012	60	-13.137481	12.63631768	-3.44111192
25	6.75E-08	-15.38316512	-2.42523513	61	-17.4164916	10.05541594	-4.22277391
26	4.489524526	-12.84747161	-1.88777019	62	-21.5172829	7.371619292	-5.47286476
27	8.881474537	-10.31177808	-1.88777026	63	-21.6181481	2.438710267	-4.98102203
28	13.32221177	-7.691582532	-2.42523534	64	-21.6181481	-2.438710512	-4.98102196
29	13.37099902	-2.535693516	-1.8877704	65	-21.5172828	-7.37161955	-5.47286456
30	13.37099901	2.535693535	-1.88777047	66	-21.332552	-12.31635481	-6.48874098
31	13.32221174	7.691582506	-2.42523555	67	-17.1426511	-14.94870399	-5.47286449
32	8.881474499	10.31177805	-1.88777054	68	-12.9210591	-17.50251034	-4.98102182
33	4.489524478	12.84747157	-1.88777054	69	-8.69708883	-19.94122071	-4.98102182
34	-4.55E-08	15.38316505	-2.42523555	70	-4.37463167	-22.32032335	-5.47286448
35	-4.48952457	12.84747155	-1.88777048	71	-7E-09	-24.63270939	-6.48874097
36	-8.88147458	10.31177801	-1.88777041	72	4.374631743	-22.32032332	-5.47286454

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
73	8.697088896	-19.94122065	-4.98102195	117	16.82465476	19.5639341	-7.17263217
74	12.92105919	-17.50251025	-4.98102201	118	12.23980157	21.1999582	-6.40241989
75	17.14265109	-14.94870387	-5.47286474	119	8.530536508	24.35254549	-7.17263217
76	21.33255201	-12.31635467	-6.4887413	120	4.215500941	26.62389155	-7.88826873
77	21.5172828	-7.371619436	-5.47286488	121	-1.26E-07	28.75164615	-9.09348702
78	21.61814803	-2.438710398	-4.98102228	122	-4.2155012	26.62389153	-7.88826867
79	21.61814802	2.438710382	-4.98102235	123	-8.53053674	24.35254545	-7.17263205
80	21.51728276	7.371619405	-5.47286508	124	-12.2398017	21.19995815	-6.40241971
81	21.33255192	12.31635464	-6.48874164	125	-16.824655	19.56393401	-7.17263192
82	17.14265104	14.94870377	-5.47286515	126	-20.9492161	16.96267661	-7.88826841
83	12.92105913	17.50251015	-4.98102249	127	-24.8996562	14.37582288	-9.09348664
84	8.697088823	19.94122054	-4.98102249	128	-28.6135461	11.65239699	-10.6873223
85	4.374631661	22.32032318	-5.47286516	129	-28.9564318	6.864892504	-9.82042409
86	-1.31E-07	24.63270921	-6.48874165	130	-29.0278167	2.331750701	-9.35582679
87	-4.37463186	22.32032316	-5.4728651	131	-29.0278167	-2.331751103	-9.35582672
88	-8.697089	19.94122049	-4.98102237	132	-28.9564318	-6.864892919	-9.8204239
89	-12.9210593	17.50251008	-4.9810223	133	-28.6135461	-11.65239743	-10.687322
90	-17.1426512	14.94870368	-5.4728649	134	-28.2302101	-16.29871962	-12.086849
91	-21.3325521	12.31635444	-6.48874132	135	-24.398045	-18.95385942	-10.6873219
92	-25.1647171	9.661214679	-7.88826828	136	-20.4233873	-21.64455934	-9.82042376
93	-25.3551915	4.78861124	-7.17263165	137	-16.5332638	-23.97295135	-9.35582652
94	-24.4796033	-1.275E-07	-6.40241932	138	-12.4945527	-26.30470223	-9.35582652
95	-25.3551915	-4.788611564	-7.17263152	139	-8.53304432	-28.509452	-9.82042375
96	-25.1647171	-9.661215022	-7.88826801	140	-4.21550096	-30.60625654	-10.6873219
97	-24.8996561	-14.37582336	-9.09348624	141	9.05E-08	-32.59743889	-12.0868489
98	-20.949216	-16.96267701	-7.88826794	142	4.215501022	-30.60625651	-10.687322
99	-16.8246548	-19.56393436	-7.17263138	143	8.533044376	-28.50945194	-9.82042388
100	-12.2398016	-21.19995842	-6.40241912	144	12.49455278	-26.30470215	-9.3558267
101	-8.53053653	-24.35254573	-7.17263137	145	16.53326381	-23.97295123	-9.35582677
102	-4.21550097	-26.62389179	-7.88826793	146	20.42338732	-21.6445592	-9.82042407
103	-2.15E-08	-28.75164641	-9.09348623	147	24.39804499	-18.95385925	-10.6873223
104	4.215501038	-26.62389176	-7.88826799	148	28.23020997	-16.29871947	-12.0868494
105	8.530536597	-24.35254567	-7.1726315	149	28.61354599	-11.65239727	-10.6873224
106	12.23980165	-21.19995834	-6.4024193	150	28.95643166	-6.864892764	-9.82042433
107	16.82465483	-19.56393424	-7.17263163	151	29.02781654	-2.331750948	-9.35582716
108	20.949216	-16.96267687	-7.88826825	152	29.02781653	2.331750856	-9.35582722
109	24.89965604	-14.37582322	-9.09348662	153	28.95643162	6.864892659	-9.82042452
110	25.16471701	-9.661214888	-7.88826839	154	28.61354593	11.65239714	-10.6873227
111	25.35519138	-4.788611429	-7.1726319	155	28.23020994	16.29871919	-12.0868498
112	24.4796032	-0.000000041	-6.40241969	156	24.39804492	18.95385903	-10.6873228
113	25.35519135	4.788611375	-7.17263203	157	20.42338724	21.644559	-9.82042466
114	25.16471695	9.661214813	-7.88826865	158	16.53326372	23.97295103	-9.35582742
115	24.89965596	14.37582311	-9.09348701	159	12.49455269	26.30470193	-9.35582742
116	20.94921593	16.96267672	-7.88826872	160	8.533044273	28.50945169	-9.82042466

С учетом ограничений, которые дают разрезы на основе секторов 120° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрезку на сфере с тремя рядами окружностей (см. рис. 5), состоящую из монтажных только шестиугольных панелей четырех типоразмеров или из правильной шестиугольной панели, одной неправильной шестиугольной панели того же радиуса, двух неправильных шестиугольных панелей разных радиусов и семнадцати треугольных панелей-вставок (для стержней – всего 15-ти типоразмеров).

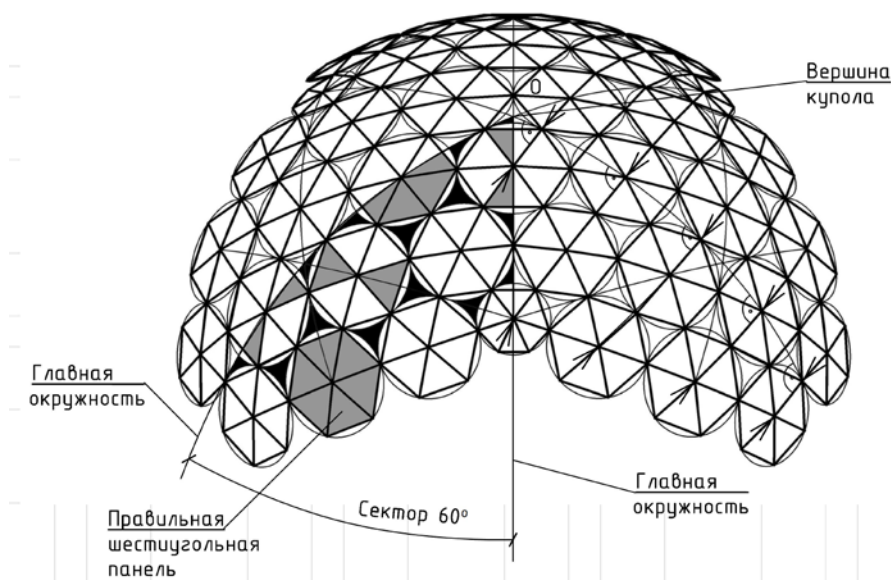


Рис. 5. Схема сборной сферической оболочки диаметром 50 м (36 м между опорами) из 3 секторов с углами на вершине 120° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними.

Опорный контур сборной оболочки выполняется разомкнутым с использованием подходы участки нестандартных панелей малого радиуса, выполненных также по главным окружностям сферы и проходящим через углы опорных шестиугольных панелей. Координаты оболочки диаметром 50 м наиболее эффективной разрезки для секторов 120° (рис. 5) приведены в таблице 2.

На основе анализа систем разбиения сферы в пределах секторов составлены базовые сферические структуры, которые предоставляют следующие три системы разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шестиугольников с треугольниками между ними (система «Т60» – рисунки 1, 2, 4);
- одноконтурная система из плоских или пространственных шестиугольников с треугольниками между ними (система «Т120» – рисунок 5);
- двухконтурная система, состоящая из шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «Т60ПС» – рисунок 1, 2, 4).

Системы разрезов показанного способа образования треугольных, шестиугольных сетей обозначены цифровыми и буквенными индексами.

Таблица 2

Координаты узлов основной части сетчатого купола для диаметра 50 м

№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)	№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-4.8E-06	1.129298	0.051117	26	3.862713	-2.23014	0.822846
2	-0.97803	-0.56461	0.051117	27	4.793107	-0.50876	0.966688
3	0.977975	-0.56469	0.051117	28	5.553313	1.105354	1.355992
4	1.95595	1.129269	0.205733	29	4.628173	2.672078	1.199999
5	0.977975	2.822938	0.362266	30	3.733919	4.256635	1.355992
6	-0.97798	2.822937	0.362266	31	2.885686	5.80767	1.813851
7	-1.95595	1.129268	0.205733	32	0.977974	5.987732	1.57111
8	-2.93372	-0.56452	0.362266	33	-0.97798	5.987732	1.57111
9	-1.95575	-2.25842	0.362266	34	-2.88569	5.807669	1.813851
10	0	-2.25854	0.205733	35	-3.73392	4.256633	1.355992
11	1.955748	-2.25842	0.362266	36	-4.62817	2.672076	1.199999
12	2.933723	-0.56452	0.362266	37	-5.55331	1.105352	1.355992
13	3.863663	1.101419	0.663236	38	-6.47243	-0.40476	1.813851
14	2.885687	2.795322	0.663236	39	-5.67452	-2.14691	1.57111
15	1.95595	4.405335	0.966688	40	-4.69654	-3.84082	1.57111
16	-7.4E-07	4.460277	0.822846	41	-3.58675	-5.40291	1.813851
17	-1.95595	4.405334	0.966688	42	-1.81939	-5.36199	1.355992
18	-2.88569	2.795321	0.663236	43	0	-5.34415	1.199999
19	-3.86366	1.101418	0.663236	44	1.819393	-5.36199	1.355992
20	-4.79311	-0.50876	0.966688	45	3.586745	-5.40291	1.813851
21	-3.86271	-2.23014	0.822846	46	4.696541	-3.84082	1.57111
22	-2.83716	-3.89657	0.966688	47	5.674515	-2.14691	1.57111
23	-0.97798	-3.89674	0.663236	48	6.472433	-0.40475	1.813851
24	0.977975	-3.89674	0.663236	49	7.113329	1.237273	2.296093
25	-4.8E-06	1.129298	0.051117	50	3.862713	-2.23014	0.822846

Системы «Т60» и «Т120» – это такая разбивка, которая позволяет собирать купол из плоских (складчатых, сферических) треугольных и шестиугольных панелей на основе секторов с углом при вершине 60° (см. рис. 1, 2, 4).

Разрезки способа «Т60ПС» дают возможность собирать двухпоясной (двухуровневый) купол такой же разрезки, что и у однопоясных куполов «Т60», но из шестиугольных пирамидальных стержневых панелей, а разрезки «Т60ПП» – из двухпоясных пространственных элементов (см. рис. 6, 7).

Таблицы 1 и 2 координат сборной сферической оболочки диаметром 100 м (60 м между опорами) из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных

панелей, а также сборной сферической оболочки диаметром 50 м (36м между опорами) из 3 секторов с углами на вершине 120° с разрезкой из шестиугольных панелей позволяют вычертить основные архитектурно-строительные чертежи покрытия здания, монтажные схемы и их фрагменты в любом ракурсе, выполнить конструирование купола, а также все статические и динамические расчеты.

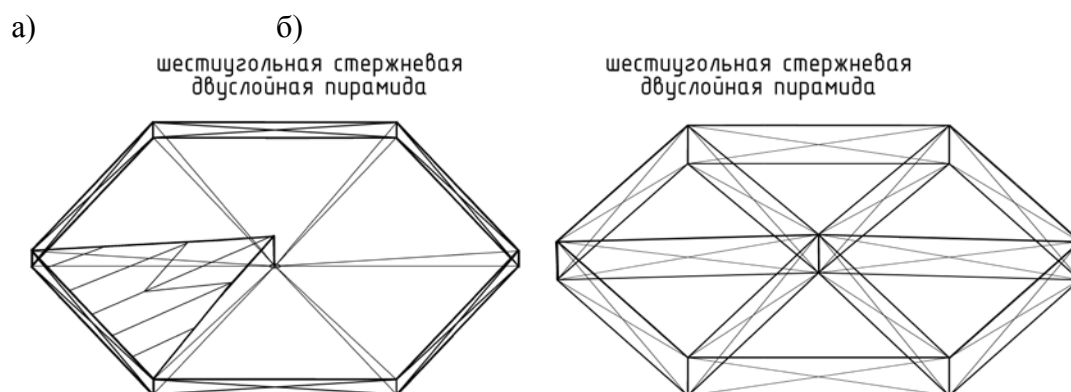


Рис. 6. Пирамидальные стержневые панели сборной сферической оболочки:
а – предварительно-напряженная шестиугольная двухуровневая панель;
б – металлодеревянная шестиугольная двухуровневая панель.

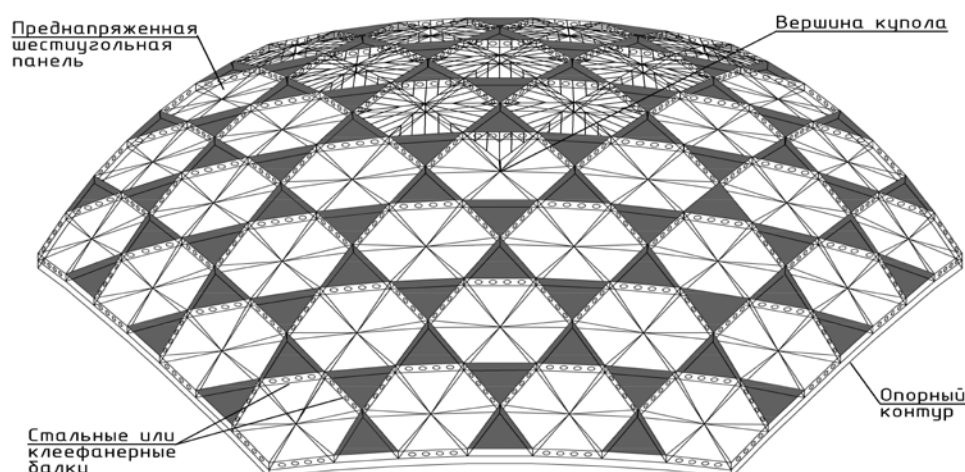


Рис. 7. Схема двухуровневой (двухслойной) разрезки сборной сферической оболочки способом «Т60ПС».

На рисунке 8 приведен пример спроектированного светопрозрачного купольного покрытия стадиона и продемонстрирована методика определения размеров сборных деталей и монтажных схем с помощью таблицы 1 координат. По приведенным рисункам и схемам можно получить визуальное представление о специфических композиционных и строительных различиях существующих геодезических оболочек и предлагаемых конструктивно-технологических форм сферических оболочек, имеющих эффективные геометрические основы.

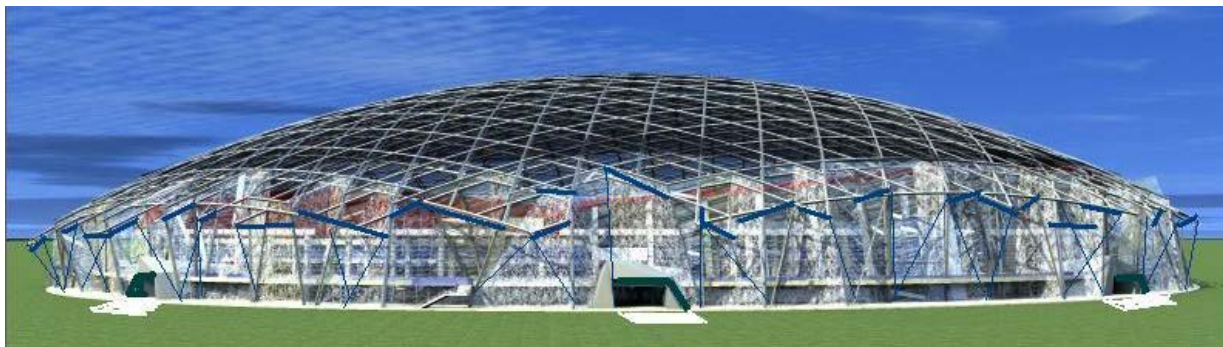


Рис. 8. Запроектированное сборное сферическое покрытие хоккейного стадиона «Айсберг» пролетом 120 м на основе секторной разрезки «П60 ПС».

Разработанные сборные сферические оболочки системы «Транер» могут применяться для покрытий зданий различного назначения, а также для устройства сферических отражателей в зеркальных антеннах и концентраторах энергии. По сравнению с аналогами, эти оболочки имеют максимум однотипных монтажных элементов, возможности укрупнительной сборки и максимум эстетического качества при минимуме сборных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов Г. Н. Композиционное формообразование кристаллических куполов и оболочек // Архитектура СССР. – 1977. – № 7. – С. 30–41.
2. Туполев М. С. Геометрия сборных сферических куполов // Архитектура СССР. – 1969. – № 1. – С. 35–41.
3. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т. Сборная сферическая оболочка. Патент на полезную модель № 129534 от 27.06.13 г.
4. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т. Сборная сферическая оболочка. Заявка на изобретение RU № 2012116363 от 20.02.14 г.

СЕЛЯЕВ В. П., НИЗИН Д. Р., ОШКИНА Л. М., ЧЕРНОВ А. Н.

**ЩЕЛОЧЕСТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ
С ПОВЫШЕННЫМИ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований упруго-прочностных характеристик и щелочестойкости эпоксидных композитов в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1. Выявлено оптимальное содержание Этал-1, позволяющее получать составы с требуемым комплексом свойств.

Ключевые слова: эпоксидное связующее, алифатический разбавитель, щелочестойкость.

SELYAEV V. P., NIZIN D. R., OSHKINA L. M., CHERNOV A. N.

**ALKALI RESISTANCE OF EPOXY COMPOSITES
WITH ADVANCED REOLOGICAL CHARACTERISTICS**

Abstract. The article presents the results of experimental studies of elastic-strength characteristics and alkali resistance of epoxy composites in relation to the content of active diluent Etal-1. The authors have revealed the optimal content of Etal-1 that allows obtaining compositions with the required combination of properties.

Keywords: epoxy binder, aliphatic diluent, alkali resistance.

Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения является задача значительного повышения долговечности как существующих, так и вновь возводимых зданий и сооружений. Это вызвано, прежде всего, непрекращающимся усилением негативного влияния факторов окружающей среды. Одним из наиболее популярных способов сохранения несущей способности строительных изделий и конструкций является использование защитно-декоративных пропиток и покрытий на полимерной основе [1; 2; 3; 4].

В связи с тем, что наибольшее агрессивное воздействие на бетоны, обладающие высоким водородным показателем ($\text{pH}=12\div13$), оказывают растворы кислот, большая часть исследований при разработке защитных покрытий, в том числе на основе эпоксидных связующих, посвящена оценке их кислотостойкости. В то же время эпоксидные композиты на основе традиционных отвердителей, как правило, обладают недостаточной стойкостью к продуктам гидратации бетона [1; 4], что требует при разработке защитных составов проведения дополнительных исследований на щелочестойкость.

Кроме того, при разработке составов защитных покрытий бетонных оснований особое внимание следует уделять обеспечению высокой адгезионной прочности наносимых

покрытий к бетонным основаниям. Сила адгезионного сцепления полимерного покрытия с подложкой является важнейшей физико-химической характеристикой, определяющей долговечность строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред. В результате взаимодействия химических реагентов с материалом в таких конструкциях происходят качественные и количественные изменения, которые зависят от характеристик материалов и особенностей воздействующей на них среды. Уже на стадии формирования адгезионного соединения возникают разнообразные дефекты – потенциальные очаги будущего разрушения. Ими могут быть различные загрязнения, оставшиеся на поверхности бетонного основания, не заполненные адгезивом углубления, воздушные включения, продукты, выделившиеся в процессе склеивания и скопившиеся на границе раздела, поры, оставшиеся после улетучивания растворителя, трещины, возникшие в процессе усадки.

Одной из основных характеристик полимерных покрытий, оказывающих наибольшее влияние на величину адгезионной прочности, является вязкость состава, обеспечивающая максимально возможную глубину пропитки бетонного основания, зависящую также от его поверхностной пористости. Повышение глубины проникновения полимерного композита вглубь бетонной подложки позволяет сформировать переходный слой между основанием и покрытием, приводя к образованию надежного адгезионного сцепления и, как следствие, повышению долговечности изделий и конструкций с полимерными покрытиями. Создаваемые таким образом изделия, распределение свойств по высоте поперечного сечения которых изменяется по определенному закону, можно отнести к функционально-градиентным [5; 6].

В данной работе снижение вязкости полимерных композиций на основе наиболее широко используемой в строительстве эпоксидной смолы ЭД-20 достигалось путем введения в состав алифатического разбавителя Этал-1, представляющего собой современный аналог традиционных разбавителей ДЭГ-1 и ТЭГ-1, в количестве 5, 10, 15, 20, 25 и 50% от массы смоляной составляющей. В качестве отверждающей системы использовался отвердитель аминного типа Этал-45М. В сочетании со смолой ЭД-20 он обладает в 3 раза большей жизнеспособностью по сравнению с традиционным отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА), позволяет дополнительно снизить вязкость полимерного связующего при обеспечении достаточно высоких физико-механических характеристик готовых композитов [7; 8].

Экспериментальные исследования упруго-прочностных характеристик проводились на образцах-восьмерках, изготовленных согласно ГОСТ 11262-80 (тип 2). Для каждого состава параллельно исследовалось не менее 6 образцов. В качестве исследуемых

характеристик определялись: предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении. Реологические характеристики полимерного связующего определялись с помощью вискозиметра ВЗ-246 с диаметром отверстия 4 мм. По результатам проведенного исследования установлено существенное снижение реологических параметров при введении в состав полимерного связующего активного разбавителя Этал-1 и использовании отвердителя Этал-45М (рис. 1). В зависимости от содержания Этал-1 (5÷50% от массы смоляной составляющей) достигнуто снижение вязкости составов, соответственно, в 1,3÷7,8 раз.

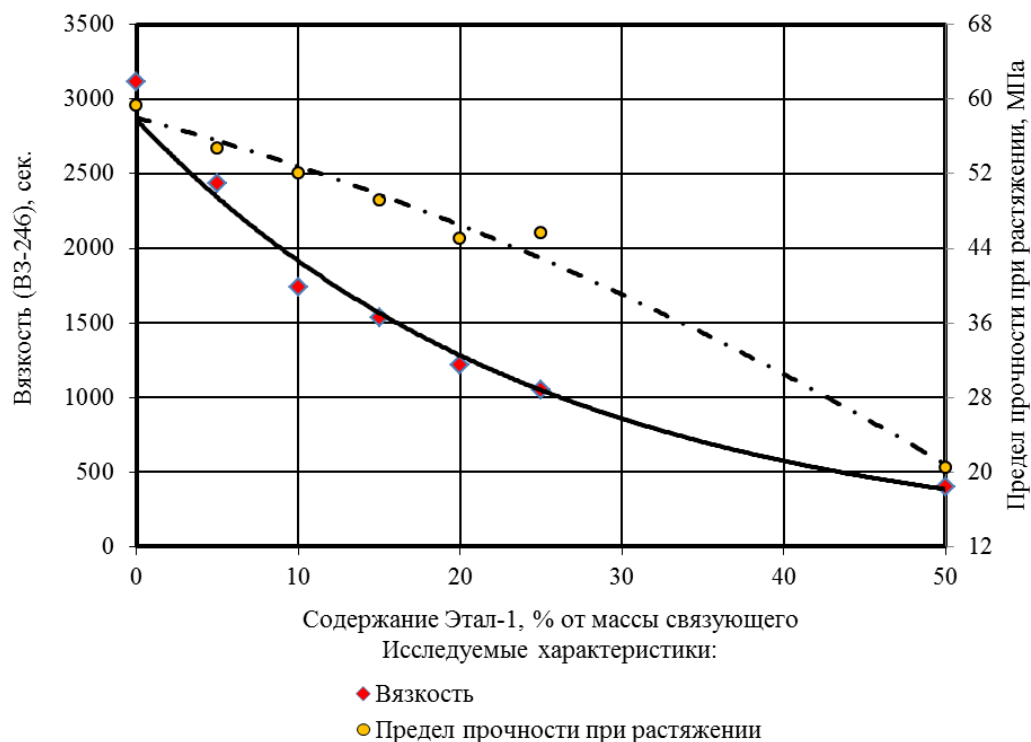


Рис. 1. Изменение реологических и прочностных характеристик эпоксидных композитов в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1.

Известно, что введение в состав полимерных связующих растворителей и разбавителей, как правило, приводит к значительному снижению упруго-прочностных характеристик. Исключение составляет использование нереакционноспособных разбавителей, проявляющих характер антипластификаторов – соединений, повышающих одновременно прочность и эластические характеристики полимерных композиций [3].

Анализ кривых деформирования эпоксидных композитов при растяжении (рис. 2, 3) показал, что введение в состав до 50% активного разбавителя приводит к снижению прочностных характеристик в 2,9 раза (рис. 1), модуля упругости – в 2,3 раз. Результаты исследования упруго-прочностных характеристик контрольных составов представлены в таблице.

Таблица

Результаты исследования составов эпоксидных покрытий контрольных составов
и после экспонирования в течение 30 суток в растворе NaOH с pH=12,5

Исследуемая характеристика	Содержание активного разбавителя Этал-1, % от мас. связующего						
	0	5	10	15	20	25	50
контрольные составы							
Предел прочности при растяжении, МПа	59,28	54,76	52,03	49,10	44,98	45,68	20,45
Модуль упругости при растяжении, МПа	636,3	593,9	568,7	557,8	211,1	519,1	279,8
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	8,62	8,75	9,03	8,39	7,43	8,90	9,18
через 30 суток экспонирования в растворе NaOH с pH=12,5*							
Предел прочности при растяжении, МПа	<u>56,30</u> 0,95	<u>51,88</u> 0,95	<u>42,05</u> 0,81	<u>41,37</u> 0,84	<u>40,29</u> 0,90	<u>36,54</u> 0,80	<u>11,59</u> 0,57
Модуль упругости при растяжении, МПа	<u>579,4</u> 0,91	<u>532,8</u> 0,90	<u>482,9</u> 0,85	<u>468,8</u> 0,84	<u>454,86</u> 0,89	<u>432,3</u> 0,83	<u>126,46</u> 0,45
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	<u>9,23</u> 1,07	<u>9,46</u> 1,08	<u>9,27</u> 1,03	<u>8,67</u> 1,03	<u>8,82</u> 1,19	<u>8,04</u> 0,90	<u>30,49</u> 3,32
Прирост массы, %	0,56	0,62	0,83	0,86	0,92	0,95	1,91

*в числителе приведены абсолютные значения, в знаменателе – относительные.

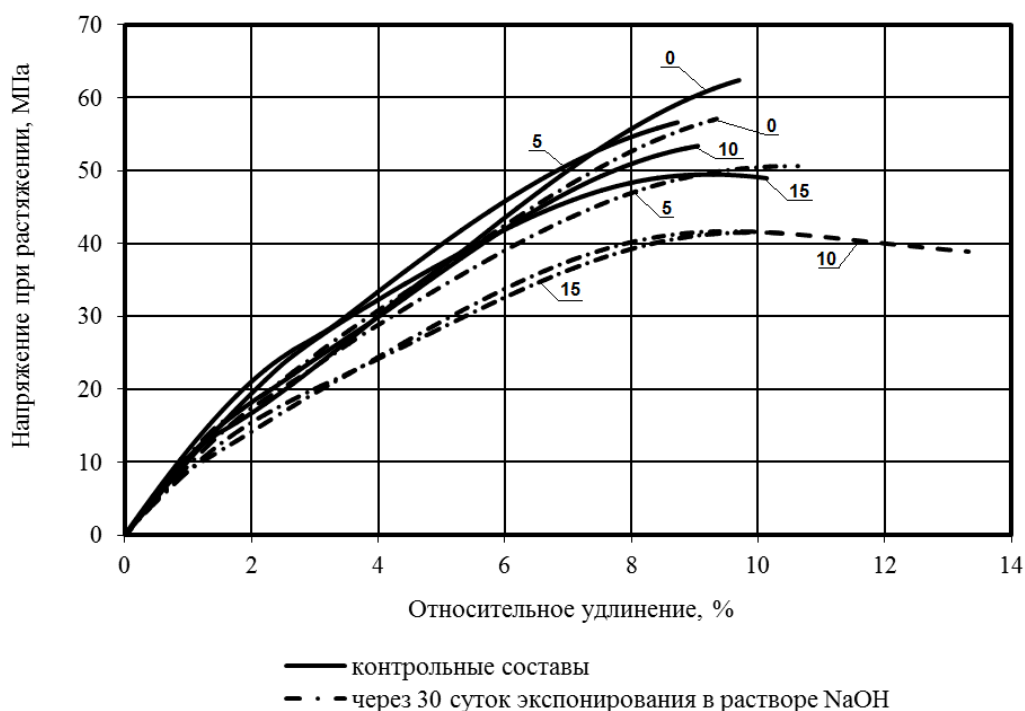


Рис. 2. Изменение кривых деформирования эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1 (0, 5, 10 и 15% от мас. связующего) для контрольных составов (сплошная линия) и через 30 суток экспонирования в растворе NaOH с pH=12,5 (штрихпунктирная линия).

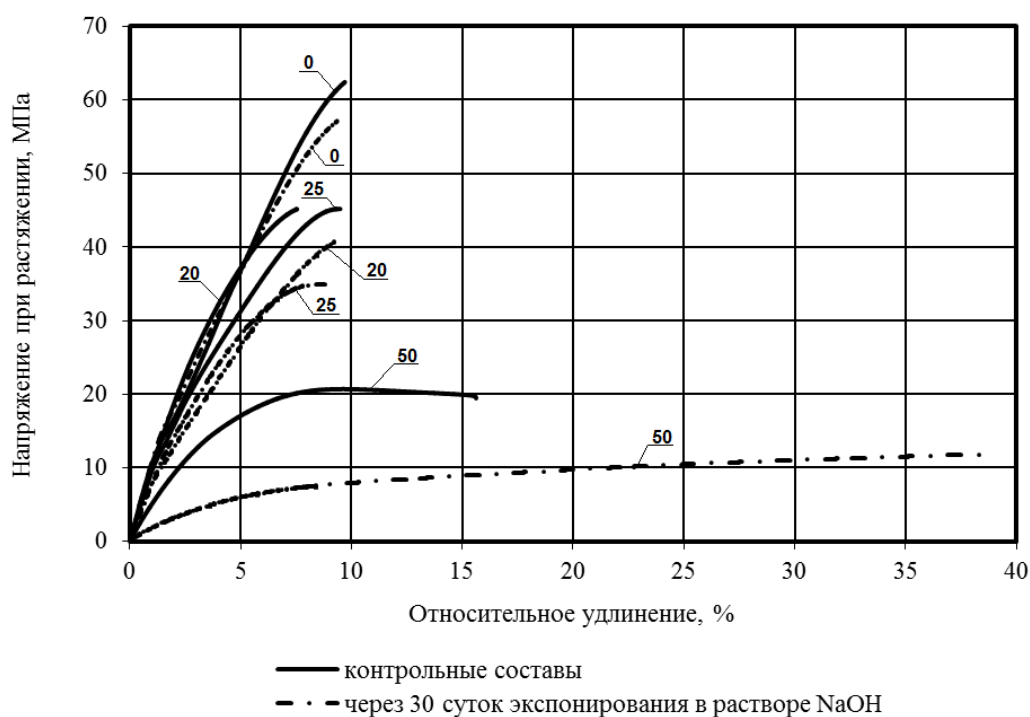


Рис. 3. Изменение кривых деформирования эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1 (0, 20, 25 и 50% от мас. связующего) для контрольных составов (сплошная линия) и через 30 суток экспонирования в растворе NaOH с pH=12,5 (штрихпунктирная линия)

Оценка щелочестойкости разработанных составов осуществлялась после экспонирования образцов в течение 30 суток в растворе NaOH с pH=12,5. Для всех исследуемых составов с содержанием исследуемого разбавителя до 25% наблюдается снижение предела прочности при растяжении, не превышающее 20% от первоначальной прочности (см. табл.). Введение 50% Этал-1 от массы смоляной части приводит к резкому снижению прочностных характеристик; относительная прочность к 30 суткам экспонирования по сравнению с контрольным составом составляет 0,57.

Изменение модуля упругости эпоксидных композитов, содержащих не более 25% Этал-1, в растворе NaOH составляет 10÷19% от первоначальной характеристики (см. табл.). Для состава с максимальным содержанием активного разбавителя относительный модуль упругости через 30 суток равен 0,45.

Анализ деформативных характеристик исследуемых композитов показал, что относительное удлинение при максимальной нагрузке для всех составов составляет 7÷10%. Экспонирование композитов с содержанием Этал-1 до 20% в растворе NaOH приводит к увеличению относительного удлинения на 3÷19%. Для композита с 50% содержанием активного разбавителя через 30 суток выдержки в щелочном растворе зафиксировано резкое увеличение относительного удлинения при растяжении, составляющее 30,49%.

Прирост массы образцов через 30 суток выдержки в растворе NaOH, повышающийся с увеличением содержания Этал-1 от 0 до 25%, составляет от $0,56 \pm 0,95\%$ (см. табл.). Введение 50% активного разбавителя приводит к увеличению сорбционной способности почти в 3,5 раза, что свидетельствует о формировании более пористой структуры. Из анализа корреляционных зависимостей, представленных на рис. 4, видно, что чем меньшее количество раствора щелочи продиффундировало в образец, тем выше химическая стойкость эпоксидных композитов (рис. 4).

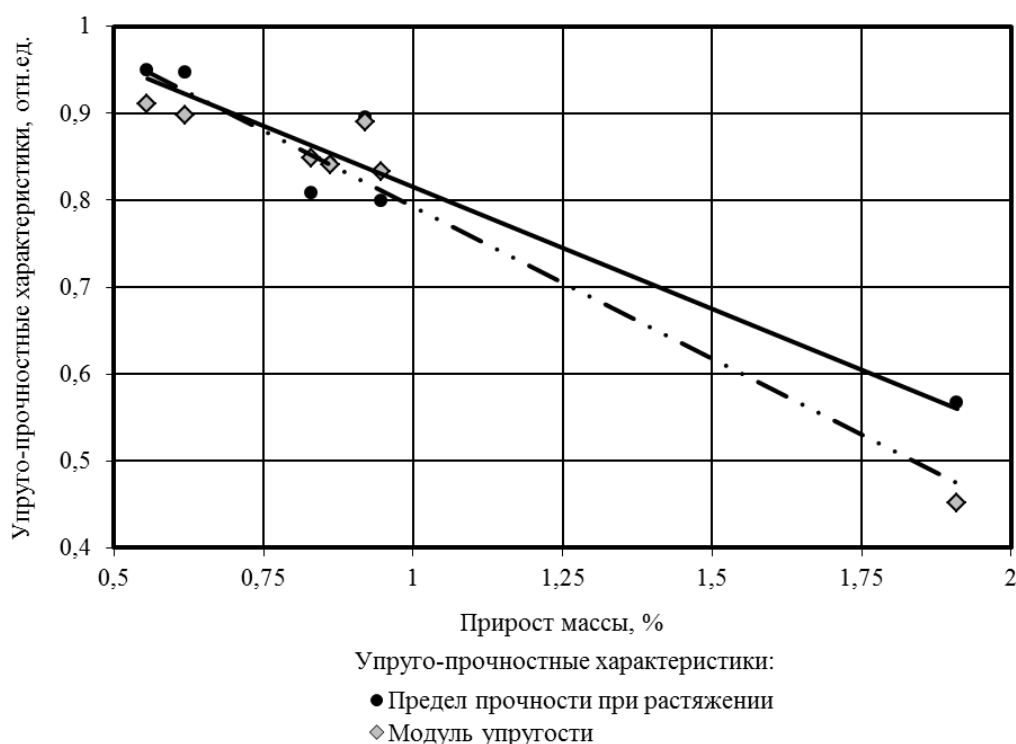


Рис. 4. Корреляционная зависимость между упруго-прочностными и сорбционными характеристиками эпоксидных композитов через 30 суток экспонирования в растворе NaOH с pH=12,5.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что составы эпоксидных композитов с содержанием от 10 до 25% активного разбавителя Этал-1 от массы смоляной части обладают требуемой подвижностью, высокими упруго-прочностными характеристиками и стойкостью в растворе щелочи с pH=12,5, что позволяет использовать их в качестве покрытий и пропиток бетонных оснований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломатов В. И., Селяев В. П., Соколова Ю. А. Химическое сопротивление материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2001. – 384 с.
2. Чернин И. З., Смехов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
3. Хозин В. Г. Усиление эпоксидных полимеров. – Казань: Дом печати, 2004. – 446 с.
4. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 260 с.
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Цыганов В. В. Разработка и применение функционально-градиентных покрытий для усиления и защиты железобетонных конструкций // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 3 (20). – С. 143–149.
6. Селяев В. П., Низина Т. А., Лазарев А. Л., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Функционально-градиентные покрытия на основе полимерных связующих // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 7. – С. 36–40.
7. Селяев В. П., Низина Т. А., Низин Д. Р., Фомин Н. Е., Юдин В. А. Влияние алифатического разбавителя Этал-1 на упруго-прочностные характеристики и щелочестойкость эпоксидных композитов // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 8. – С. 14–19.
8. Молоков М. В., Низин Д. Р., Старцев О. В., Низина Т. А. Результаты экспериментальных исследований полимерных композиционных материалов на основе низковязких эпоксидных связующих // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-ehksperimentalnykh-issledovaniij-polimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-nizkovyazkikh-ehpoksidnykh-svyazuyushhikh>.

НИЗИНА Т. А., БАЛБАЛИН А. В., БАЛЫКОВ А. С.

**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ**

Аннотация. Изложен алгоритм определения фрактальной размерности кривых деформирования на основе анализа индекса длины, позволяющий получать интегральную количественную оценку процесса разрушения строительных композитов при сжатии. Проведено сравнение предлагаемого метода с алгоритмами определения показателя Херста и фрактальной размерности методом покрытия квадратами. Показано преимущество методики, основанной на определении фрактальной размерности по индексу длины кривых деформирования.

Ключевые слова: кривая деформирования при сжатии, композиционный строительный материал, фрактальная размерность, индекс длины, метод Херста, метод покрытия квадратами.

NIZINA T. A., BALBALIN A. V., BALYKOV A. S.

**FRactal Analysis of Deformation Curves
of Composite Building Materials under Compression**

Abstract. The article considers the algorithm of determining the fractal dimension of deformation curves based on the index of length analysis in order to obtain the integral quantitative estimation of destruction of building composites under compression. The authors compare the method suggested with the algorithms of determining the Hurst exponent and fractal dimension by the method of squares. The study shows the advantage of the method based on determining of the fractal dimension on the index of length of deformation curves.

Keywords: deformation curve under compression, composite building material, fractal dimension, index of length, Hurst exponent, method of squares.

Известно, что разрушение строительных материалов представляет собой процесс множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов и микротрещин вплоть до появления макротрещин. Процесс разрушения бетона под действием силовых факторов зарождается на микроуровне как дискретный акт продвижения первичной микротрещины до точки бифуркации, которая является дефектом структуры в виде зерна наполнителя или поры. Процесс разрушения образца складывается из дискретных актов разрушения на микромасштабном уровне [1]. При этом разрушение имеет вероятностную природу, а сам процесс накопления повреждений самоподобен, что позволяет использовать аппарат теории фракталов.

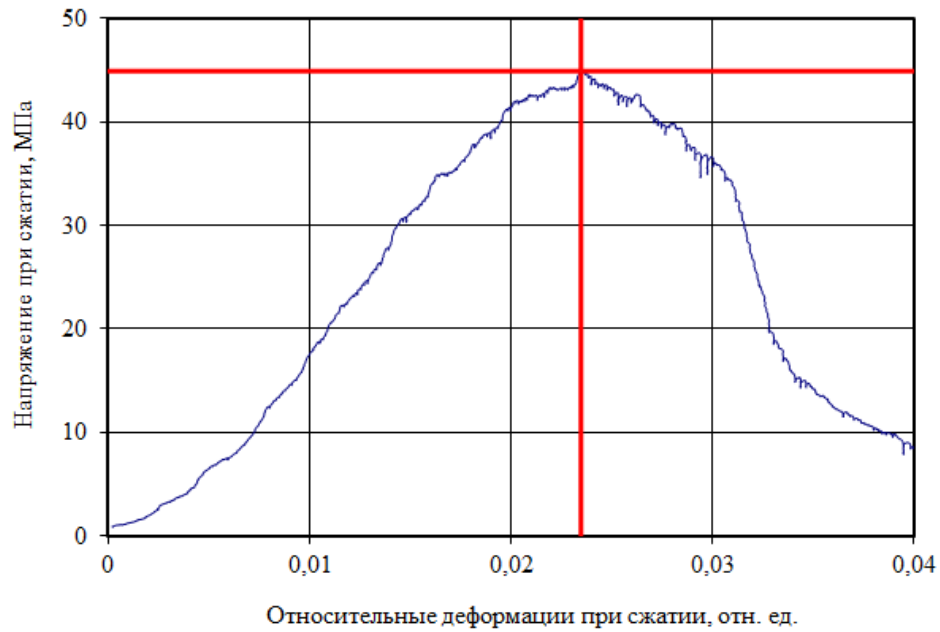
В научной литературе приводится достаточно много различных способов определения фрактальной размерности структуры реальных композиционных материалов на основе цементных вяжущих и полимерных связующих [2–8]. Выявлено, что использование фрактального анализа для количественной оценки структурной неоднородности полимерных материалов и поровой структуры цементных композитов позволяет найти компактный способ описания подобных объектов. Предложены модифицированные методы определения фрактальной размерности наполненных полимерных композитов по длине профиля и площади поверхности, являющиеся более удобными и легко реализуемыми по сравнению с традиционным методом покрытия квадратами [7; 8].

Программное обеспечение современного испытательного оборудования представляет собой высокоточную систему сбора и регистрации результатов с возможностью получения обширного объема данных. Фиксирование изменения силы и деформации в процессе нагружения образца может происходить с интервалом не только в доли минуты, но и доли секунды [1; 9]. В зависимости от режима испытания, скорость нагружения при использовании подобных испытательных комплексов может быть задана в виде постоянной величины, характеризующейся нарастанием напряжений или деформаций во времени. Используемый в данной работе программно-аппаратный комплекс установки для испытания строительных материалов WilleGeotechnik® (модель 13-PD/401) позволяет фиксировать изменение напряжений и деформаций образца в процессе нагружения с достаточно малым шагом (0,01 сек. и менее), что дает возможным использовать получаемые результаты (рис. 1, а) для их анализа с позиций фрактальной геометрии.

При построении фрагментов кривой деформирования в более крупном масштабе наглядно видно (рис. 1, б), что процесс нарастания деформаций сопровождается дискретными актами повышения и падения напряжений. Так же для ряда участков диаграммы деформирования наблюдается прирост и снижение относительных деформаций без существенного прироста напряжений.

Учитывая, что прирост напряжений и деформаций в образце при проведении испытаний на сжатие развивается во времени с определенным (заданным) шагом, появляется возможность применения для анализа кривых деформирования теории фракталов. К подобным временным рядам относят широкий спектр различных процессов – от стохастических (броуновского движения) до детерминированных. Широкая распространенность фрактальных свойств временных рядов свидетельствует о наличие единого универсального механизма, приводящего к возникновению фрактальности в совершенно различных реальных системах.

а)



б)

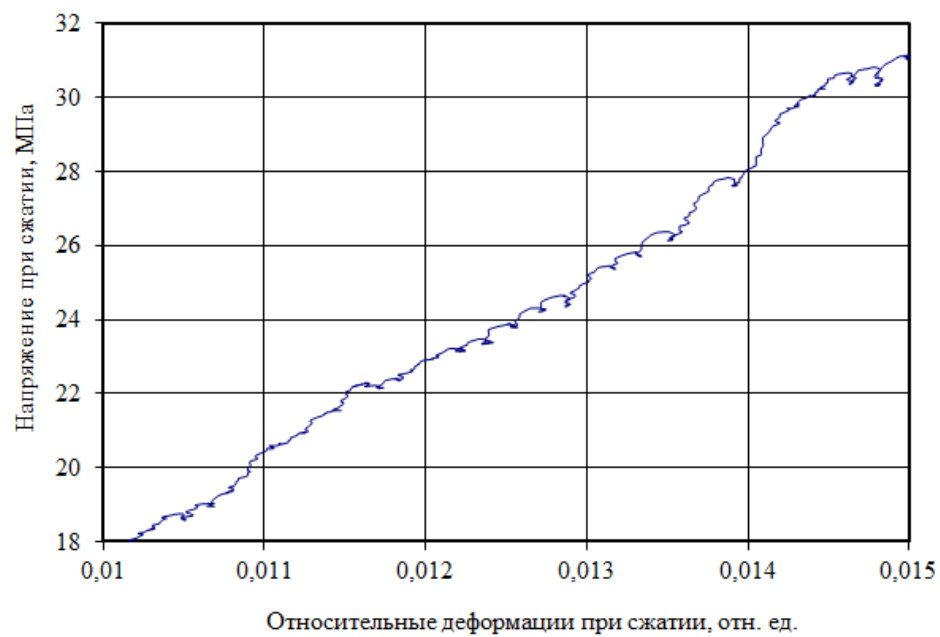


Рис. 1. Общий вид (а) и фрагмент (б) кривой деформирования составов цементных композитов при сжатии.

Рассмотрим способы определения фрактальной структуры временных рядов $y(t)$. Пусть Δ – окрестность точки $t \in [0, T]$. Тогда фрактальная размерность функции $y(t)$ на промежутке $[t - \Delta, t + \Delta]$, определяемая методом покрытия квадратов со стороной $\delta < \Delta$, будет определяться по формуле:

$$D(\Delta, t) = \lim_{\frac{N(\delta)}{\ln(\frac{1}{\delta})}} = 1 + \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(A(\delta))}{\ln(\frac{1}{\delta})}, \quad (1)$$

где $N(\delta)$ – количество квадратов со стороной δ , покрывающих график функции $y(t)$ на промежутке $[t - \Delta, t + \Delta]$;

$A(\delta)$ – площадь покрытия, определяемая как $A(\delta) = N(\delta) \times \delta$.

Фрактальная размерность $D(\Delta, t)$ является интегральной характеристикой функции на промежутке $[t - \Delta, t + \Delta]$, зависит от длины промежутка Δ и существует для любой непрерывной функции $y(t)$. Если функция непрерывно дифференцируема, то [10]:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(A(\delta))}{\ln(\frac{1}{\delta})} = 0 \text{ и } D(\Delta, t) = 1.$$

Следовательно, если $D(\Delta, t) > 1$, то это свидетельствует о наличии фрактальной структуры рассматриваемого временного процесса.

Выберем в промежутке $[t - \Delta, t + \Delta]$ совокупность точек $t_o = t - \Delta < t_1 < \dots < t_n = t + \Delta$ и определим длину ломаной

$$L_n = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (2)$$

соединяющей прямыми отрезками последовательные соседние точки $(t - \Delta, y_o)$, $(t_1, y_1), \dots, (t + \Delta, y_n)$, где l_i – длина отрезка, соединяющего на плоскости $y(t) - t$ точки $(t_{i-1}, y_{i-1}), (t_i, y_i)$, определяемая по формуле:

$$l_i = \sqrt{(t_i - t_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}. \quad (3)$$

В случае равномерной сетки разбиения интервала $[t - \Delta, t + \Delta]$ имеем $t_i = t_{i-1} + \delta$.

Пусть количество точек неограниченно увеличивается ($n \rightarrow \infty$) так, что $\delta \rightarrow 0$. Если функция не имеет фрактальной структуры, то $\lim_{\delta \rightarrow 0} L_n(\delta) = L$,

где L – длина кривой, соответствующей графику функции $y(t)$.

Пусть функция $y(t)$ такова, что $L_n(\delta) \rightarrow +\infty$ при $\delta \rightarrow +0$, причем

$$L_n(\delta) \sim \delta^{-\gamma}; \gamma > 0; \delta \rightarrow 0. \quad (4)$$

Тогда функция $y(t)$ имеет фрактальную структуру, а величина $\gamma > 0$ является её показателем и определяет степень фрактальной структуры: чем больше величина γ , тем больше степень фрактальной структуры исследуемой функции. В работе [10] величину γ предлагается называть индексом длины и определять как

$$\gamma = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(L(\delta))}{\ln(\frac{1}{\delta})}. \quad (5)$$

Геометрически индекс длины определяется как тангенс угла наклона в двойном логарифмическом масштабе прямой при малых $\delta > 0$:

$$\ln(L(\delta)) = a + \gamma \times \ln(\frac{1}{\delta}). \quad (6)$$

Из определения фрактальной размерности функции $y(t)$ следует, что исследуемая функция должна быть определена на всем множестве точек промежутка $[t - \Delta, t + \Delta]$.

Однако, временные ряды во многих областях техники представляют собой последовательности $y_i, i = 1, \dots, n$, где индекс i указывает на дискретные фиксации времени, для которых известны значения исследуемого временного интервала.

Рассмотрим дискретный временной процесс в виде временного ряда

$$y_1, \dots, y_n. \quad (7)$$

Произведем разбиение совокупности чисел $i = 1, \dots, n$ на группы с делителем m_1 :

$$j = 1: i = 1, \dots, m_1; j = 2: i = m_1 + 1, \dots, 2 \times m_1;$$

$$j = n_1: i = (n_1 - 1) \times m_1 + 1, \dots, n_1 \times m_1,$$

$$\text{где } n_1 = \left\lfloor \frac{n}{m_1} \right\rfloor.$$

Аналогично проведем разбиение совокупности чисел $i = 1, \dots, n$ на n_2 групп ($n_2 = \left\lfloor \frac{n}{m_2} \right\rfloor$) с делителем m_2 и т.д. вплоть до m_k .

Рассмотрим для временного дискретного ряда аналог индекса длины γ , определяемого для функции непрерывного аргумента равенством (5). Соединим соседние последовательности точек

$$(0, y_1), \left(\frac{m_1}{n}, y_{m_1}\right), \left(\frac{2 \times m_1}{n}, y_{2 \times m_1}\right), \dots, \left(\frac{(n_1 - 1) \times m_1}{n}, y_{(n_1 - 1) \times m_1}\right), \left(\frac{n_1 \times m_1}{n}, y_{n_1 \times m_1}\right)$$

прямыми отрезками.

Обозначим $L(m_i)$ длину ломанной, соединяющей последовательно пары соседних точек. Тогда, соответственно, для m_1, m_2 и m_k имеем:

$$\begin{aligned} L(m_1) &= \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\frac{m_1^2}{n^2} + (y_{i \times m_1} - y_{(i-1) \times m_1})^2}; \\ L(m_2) &= \sum_{i=1}^{n_2} \sqrt{\frac{4 \times m_1^2}{n^2} + (y_{i \times m_2} - y_{(i-1) \times m_2})^2}; \\ &\dots \\ L(m_k) &= \sum_{i=1}^{n_k} \sqrt{\frac{m_1^2 \times n_k^2}{n^2} + (y_{i \times m_k} - y_{(i-1) \times m_k})^2}. \end{aligned}$$

Очевидно, что справедливы неравенства

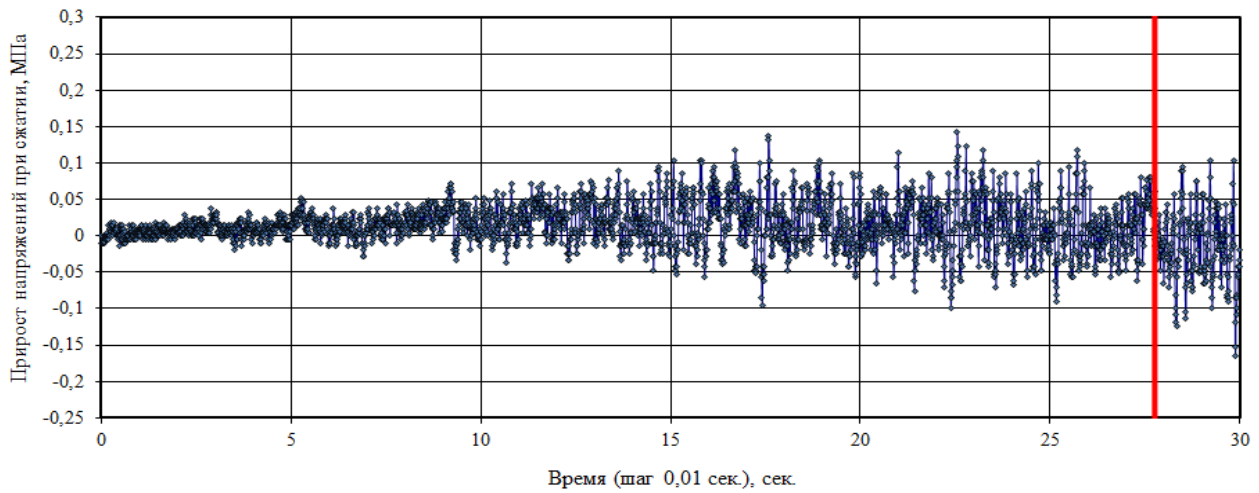
$$L(m_k) < L(m_{k-1}) < \dots < L(m_1).$$

Тогда индекс длины дискретного временного ряда (7) определим как тангенс угла наклона прямой в двойном логарифмическом масштабе $\ln(m) - \ln(L(m))$.

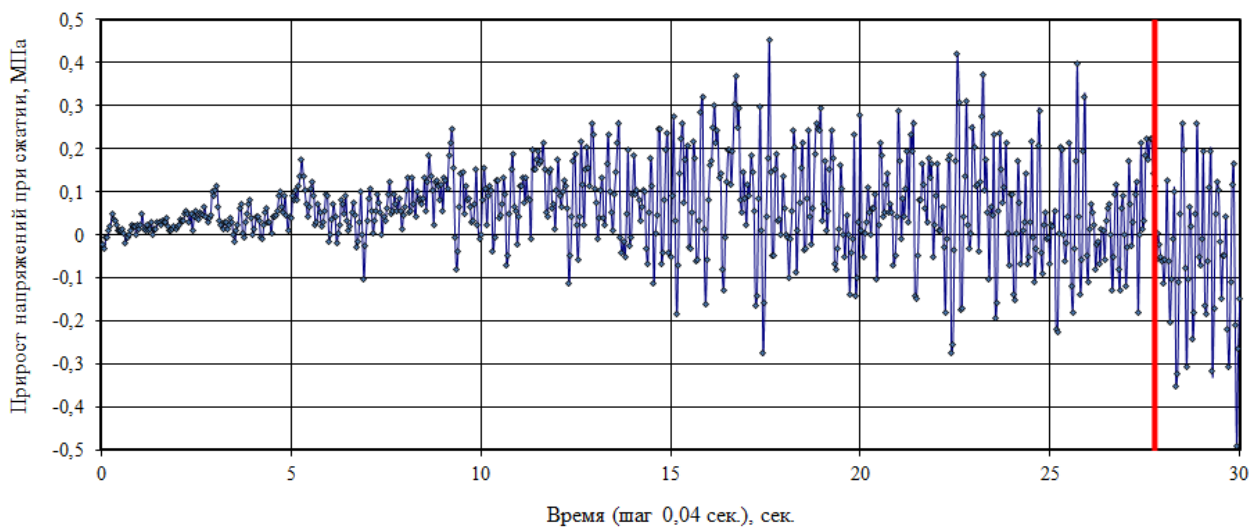
Проведем анализ кривых деформирования (до точки разрушения), представив данные в виде временных рядов, описывающих прирост в процессе нагружения напряжений (рис. 2) и относительных деформаций с разным шагом: 0,01; 0,04 и 0,16 сек. Определим длины ломанных, построенных на разных масштабных уровнях (с шагом 0,01; 0,02; 0,04; 0,08 и 0,16 сек.) по формуле (3). Индекс длины, определенный по тангенсу угла наклона длины временного ряда в зависимости от масштабного фактора (интервала между

экспериментальными точками) в двойных логарифмических координатах для данного образца составит $\gamma = 0,752$ (рис. 3). Соответственно, значение фрактальной размерности кривой деформирования исследуемого состава – $D_\gamma = 1,752$.

а)



б)



в)

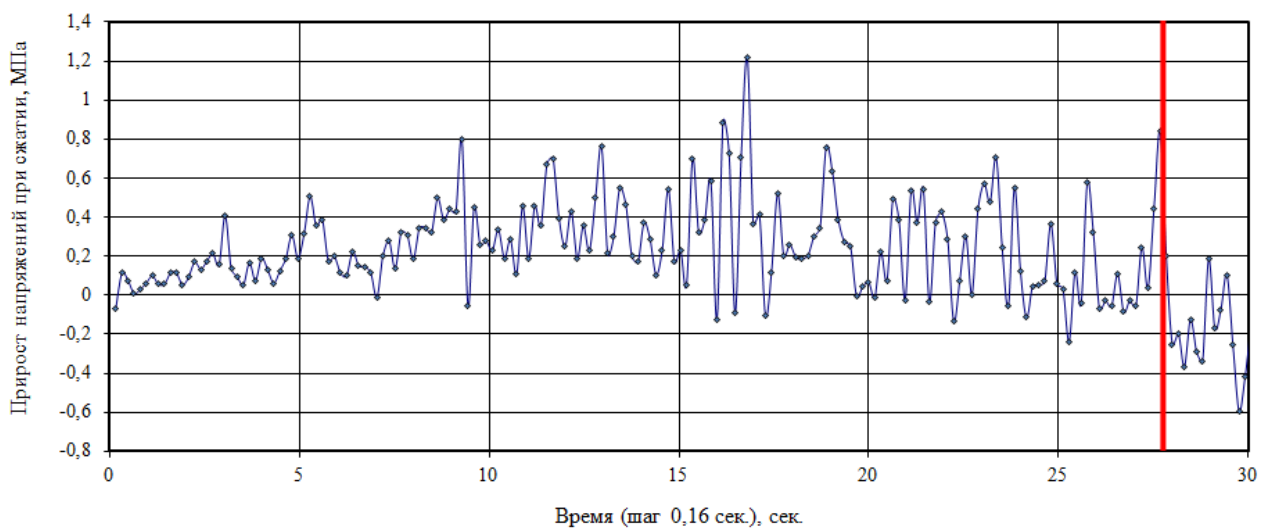


Рис. 2. Временные ряды прироста напряжений в зависимости от шага фиксации показаний: а – 0,01; б – 0,04; в – 0,16 сек. (вертикальной линией обозначен момент разрушения образца).

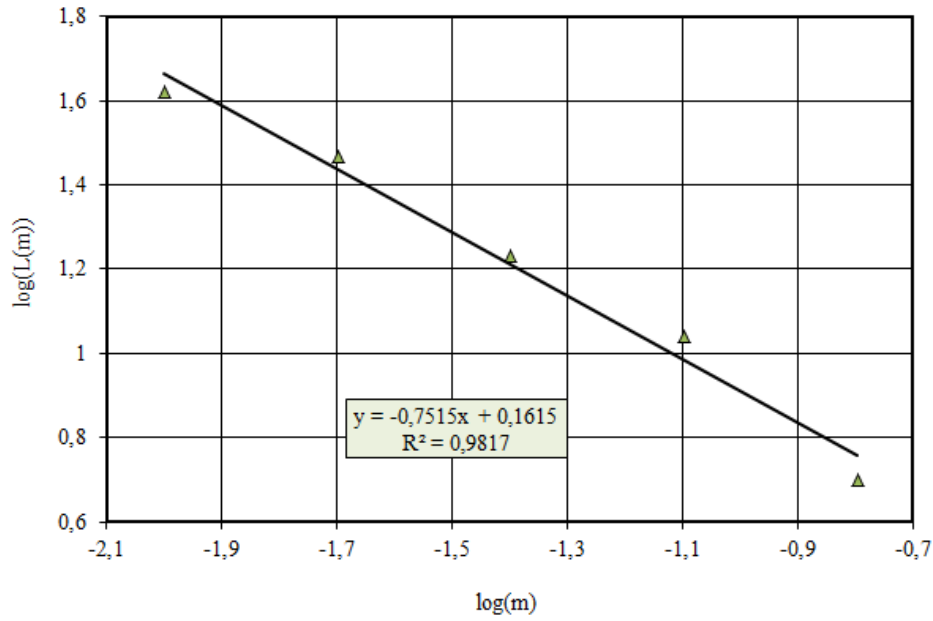


Рис. 3. Зависимость наклона длины временного ряда в зависимости от масштабного фактора (интервала между экспериментальными точками) в двойных логарифмических координатах.

Сравним алгоритм определения индекса длины с алгоритмом определения показателя Херста для дискретного временного ряда (7). Введем обозначения:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{j} \times \sum_{i=1}^j y_i;$$

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^i (y_k - \bar{y}_j);$$

$$R_j = \max_{i=1, \dots, j} y_{ij} - \min_{i=1, \dots, j} y_{ij};$$

$$S_j^2 = \frac{1}{j} \times \sum_{i=1}^j (y_i - \bar{y}_j)^2, j = 2, \dots, n.$$

Зададим k целых чисел $2 \leq n_1 < n_2 < \dots < n_k = n$. Тогда угловой коэффициент прямой, аппроксимирующей совокупность точек в координатах $\ln\left(\frac{R_j}{S_j}\right) - \ln\left(\frac{n_j}{2}\right)$, $j = 1, \dots, k$, позволит определить показатель Херста временного ряда.

Вычисление показателя Херста является на сегодняшний день одним из основных методов определения фрактальной размерности временных рядов. Однако, исходный метод вычисления H через R/S достаточно трудоемок, поэтому для его определения в достаточно часто используют степенную зависимость [11]:

$$\langle (X_{i+\delta} - X_i) \rangle \sim \delta^H. \quad (8)$$

При этом величину показателя Херста определяют как коэффициент наклона графика функции $y = f(\delta) = \langle (X_{i+\delta} - X_i) \rangle$, построенного в двойном логарифмическом масштабе. Однако, основным недостатком данного метода является необходимость большого количества данных, а также достаточно медленный выход на асимптотику при анализе реальных фрактальных структур [10, 12].

Как отмечается в работе [10], при определении фрактальной размерности через показатель Херста «часто особую роль играет «искусство» правильного выбора системы аппроксимаций», а для естественных фрактальных структур все известные методы позволяют определять размерность с некоторой ошибкой, которая во много зависит от выбранной системы аппроксимации. Действительно, при рассмотрении модельных множеств (множества Кантора, кривой Коха и т.д.) используются специфические последовательности аппроксимации – выбранные системы покрытий являются минимальными для данных множеств и $S(\delta)$ выходит на асимптотический режим, начиная с максимально возможного δ . Однако, если построить аналогичный график для систем покрытий, отличных от использованных, то соответствующие точки уже не будут идеально ложиться на одну прямую.

Предлагаемый алгоритм определения фрактальной размерности кривых деформирования на основе индекса длины позволяет получить интегральную количественную оценку процесса разрушения строительных композитов при сжатии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Куприяшкина Л. И., Неверов В. А., Селяев П. В. Фрактальные модели разрушения бетонов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 11–22.
2. Фролкин О. А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Саранск, 2000. – 223 с.
3. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Определение фрактальной размерности как структурного параметра при анализе полимерных композитов // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения: Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – С. 73–76.
4. Низина Т. А., Селяев В. П., Зимин А. Н. Анализ поровой структуры цементных композитов на основе методов фрактальной геометрии // Актуальные вопросы строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – С. 212–217.
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Фрактальный анализ структуры наполненных эпоксидных композитов // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – Вып. 10. – Тула, 2006. – С. 123–128.

6. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А. Фрактальный анализ структуры наполненных полимерных композитов // Известия ВУЗов. Строительство. – № 4, – 2007. – С. 43–48.
7. Низина Т. А. Экспериментально-теоретические основы прогнозирования и повышения долговечности защитно-декоративных покрытий: дис. ... докт. техн. наук. – Саранск, 2007. – 408 с.
8. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
9. Низина Т. А., Селяев В. П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций факторов: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 115–121.
10. Старченко Н. В. Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2005. – 122 с.
11. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. – N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.
12. Федер Е. Фракталы / пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

НУРЛЫБАЕВ Р. Е., ГРИШЕНКОВ Д. И., ЛАВРЕНТЬЕВ О. В., КУПРИЯШКИНА Л. И.
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ПЕНОБЕТОНОВ,
НАПОЛНЕННЫХ ДИАТОМИТАМИ

Аннотация. Изучена возможность получения пенобетонов с использованием в качестве наполнителя диатомитов Республики Мордовия. Показана технология получения теплоизоляционных материалов с введенными добавками. Проанализирована пористость структуры полученных образцов и выбран оптимальный состав с учетом теплоизоляционных характеристик ограждающих конструкций.

Ключевые слова: пенобетон, диатомит, наполнитель, пенообразователь, поровое пространство, структура, теплопроводность.

NURLIBAEV R. E., GRISHENKOV D. I., LAVRENTEV O. V., KUPRIYASHKINA L. I.
OPTIMIZATION OF FOAM CONCRETE COMPOSITION
BY USING DIATOMITE AS A FILLER

Abstract. The possibility of obtaining foam concretes by using the diatomites of Mordovia Republic as fillers is studied. The technology of production of thermal insulation materials with additives is shown. The authors analyze the porosity structure of the obtained samples and select the optimal composition, considering the characteristics of walling thermal insulation.

Keywords: foam concrete, diatomite, filler, foaming agent, pore volume, structure, thermal conductivity.

В течение многих лет во всем мире вопросам теплоизоляции ограждающих конструкций зданий, сооружений промышленного назначения и тепловых сетей, как наиболее эффективному пути сокращения теплопотерь, уделяется пристальное внимание. В России вопросы теплосбережения в последние годы также вошли в ряд первоочередной важности. Изменение требований по теплоизоляции зданий в 2002 г. еще больше актуализировало проблему разработки, производства и применения энергосберегающих теплоизоляционных материалов.

Одним из распространенных теплоизоляционных ограждающих материалов является пенобетон. В качестве наполнителей при изготовлении пенобетонов возможно использование минерально-сырьевых ресурсов и отходов производства Республики Мордовия, что позволит снизить расход цемента и стоимость материала без ухудшения физико-механических свойств. При проведении исследований использовались: диатомит Атемарского месторождения, цеолитосодержащие породы Атяшевского месторождения,

отходы газобетонов (составы наполненных композиционных материалов приведены в табл. 1).

Повышенный интерес к пенобетонам потребовал создания нового типа пенообразователя с более высокими функциональными возможностями и на доступном сырье. В качестве последнего могут выступать вторичные продукты биохимической промышленности. В частности, остаются невостребованными мицелиальные отходы производства антибиотиков. Их утилизация дает возможность решить некоторые экологические проблемы основного производства.

Таблица 1.

Составы наполненных пенобетонов

№п/п	Составляющие элементы, г		Пеноконцентрат, г			Вода в растворе, г			Вода в пене, г		
	це-мент	напол-нитель	для диато-мита	для цео-лита	для газо-бето-на	для диато-мита	для цео-лита	для газо-бето-на	для диато-мита	для цео-лита	для газо-бето-на
1	300	90	5,0	4,0	3,5	190	173	170	180	140	123
2	300	135	5,0	4,0	3,5	233	209	203	180	140	123
3	300	180	5,0	4,0	3,5	276	245	237	180	140	123
4	300	90	5,5	4,5	4,0	172	155	153	198	158	140
5	300	135	5,5	4,5	4,0	215	191	186	198	158	140
6	300	180	5,5	4,5	4,0	258	226	220	198	158	140
7	300	90	6,0	5,0	4,5	154,5	138	135	216	175	158
8	300	135	6,0	5,0	4,5	197	174	168	216	175	158
9	300	180	6,0	5,0	4,5	240	210	202	216	175	158

Примечание. Во составах использовался портландцемент марки 400; отношение пеноконцентрата «Унипор» к воде в пене равно 1 : 35; водотвердое отношение (В/Т) для составов, наполненных диатомитом – 0,95; наполненных цеолитом – 0,80; наполненных отходами газобетонов – 0,75.

Одним из важных свойств пенообразователя, применяемого для производства ячеистых бетонов, является возможность получения устойчивой во времени пены, а, следовательно, смеси без осадки и расслоения. Ее стабилизация обычно достигается введением в раствор веществ, которые, увеличивая вязкость раствора и пленок, способствуют замедлению истечения жидкости из пены. Для получения экспериментальных образцов использовался пенообразователь «Унипор», выпущенный фирмой «Кунай» Кустанайской области. В отличие от пеноконцентрата «Биопор», он является неорганическим продуктом высокой концентрации.

В производственном процессе пену рекомендуется использовать сразу же при ее образовании, при тестовых (лабораторных) испытаниях нужно учитывать, что пена сохраняет свои свойства при нормальных условиях в течение 8–12 ч.

Для приготовления пенобетонной смеси рекомендуется применять портландцемент марок ПЦ 400-Д0, ПЦ 500-Д0. Тонкость помола цемента должна быть такой, чтобы масса остатка на сите № 008 при просеивании цемента была не более 15%. Оптимальная удельная поверхность цемента должна находиться в пределах 3200–3500 см²/г. Содержание воды в пористом бетоне складывается из расчетного количества, необходимого для затворения раствора, и воды, содержащейся в пене.

Перед добавлением пены водоцементное отношение раствора должно составлять минимум 0,35. Слишком низкое значение водоцементного отношения может явиться причиной получения изделия с более высокой, чем заданная, объемной плотностью. Это обусловлено тем, что цементное вяжущее во время процессов гидратации будет забирать часть воды из пены, вызывая ее частичное разрушение, т. е. снижение ее объема в пенобетонной смеси. Оптимальное соотношение В/Ц – в интервале от 0,40 до 0,45.

Предварительно пеноконцентрат разводится водой в пропорции 1 : 35÷40 в отдельной емкости. Материал, из которого изготовлена емкость, должен быть химически инертен. Емкость тщательно промывается. Сначала заливается вода, затем мерной кружкой добавляется необходимое количество пеноконцентрата и производится кратковременное перемешивание.

Объемный вес пены должен составлять от 75 до 85 г/л. Если пена будет слишком легкой, она будет плохо перемешиваться с бетонной смесью, если тяжелой – будет быстро терять устойчивость. Качественная пена характеризуется белым цветом и способностью удерживаться в перевернутом вверх дном ведре.

Рассмотрим пеноматериалы, полученные с использованием в качестве наполнителя диатомита, который имеет большую пористость и, соответственно, высокую водопотребность. Поэтому при наполнении им пенобетона происходила трансформация воды как в растворе, так и в пене, в порах диатомитовой породы. Большой забор воды из приготовленной пены ведет к разрушению пор пенистой структуры. Разрушаясь, поры становятся крупнее. Они уже имеют малую удерживающую способность, что сильно ухудшает устойчивость пены в целом. При изготовлении образцов при добавлении в приготовленную пену твердых составляющих происходила значительная осадка пеносостава. Для улучшения стабильности пены предлагается предварительно замачивать порошок диатомита.

Согласно результатам проведенного эксперимента, средняя плотность испытанных образцов варьировалась в пределах $540 \div 1096 \text{ кг/м}^3$, предел прочности при сжатии – $0,522 \div 2,400 \text{ МПа}$, средняя пористость – $37 \div 42\%$. По прочности и средней плотности полученные образцы относятся к конструкционно-теплоизоляционным материалам.

Для улучшения устойчивости пены в качестве добавок применяли жидкое стекло и клей ПВА. Твердение пенобетона осуществлялось в автоклаве. Автоклавирование велось по следующей технологической цепочке: подъем температуры ($173 \text{ }^\circ\text{C}$) и давления ($0,8 \div 0,9 \text{ МПа}$) в течение 1,5 ч; выдержка при постоянном давлении и температуре – 5 ч; снижение температуры и давления до 0 в течение 2 ч. Твердение в пропарочной камере осуществлялось, как и для основного эксперимента, по следующей схеме: подъем температуры до $90 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч; выдержка при постоянной температуре в течение 8 ч; снижение температуры в течение 2 ч.

Для определения качества были проанализированы основные характеристики пенобетонов: объемная масса, пористость, теплопроводность, прочность и др. Известно, что пористость теплоизоляционных материалов может достигать $90 \div 98\%$. У пористых материалов передача тепла происходит как через стенки пор, так и через пузырьки воздуха, заключенные в порах. Поэтому материалы, имеющие большую пористость, обладают более низкой теплопроводностью. При равной пористости более высокими теплоизоляционными свойствами обладают материалы, имеющие мелкие замкнутые поры.

Предел прочности при сжатии зависит от средней плотности материала и нормируется. Минимальный класс бетона по прочности (В 0,5) соответствует средней плотности 400 кг/м^3 для неавтоклавного бетона и 300 кг/м^3 для автоклавного бетона. При меньших средних плотностях прочность не нормируется.

Для пористых структур очень важны параметры однородности, микропористости и закрытости пор [1]. Закрытость пор характеризуется объемом открытых пор W . Он изменяется в пределах от 0 до 100% от общего объема пор. При $W = 0$ все поры закрыты, что положительно сказывается на физико-механических свойствах материалов. Однородность пор характеризуется коэффициентом однородности α . Он изменяется в пределах от 0 до 1. При $\alpha \rightarrow 1$ монокапиллярность материала увеличивается, т. е. поры более однородны.

Представление о размерах пор нам дает коэффициент микропористости K_m , изменяющийся от 0 до 1. При $K_m = 0$ структура композита макропористая, и, наоборот, при $K_m = 1$ – микропористая.

Теплопроводность является главной характеристикой теплозащитных свойств материала, варьируясь при комнатной температуре в интервале $0,029 \div 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$.

Проведем анализ экспериментально полученных пеноматериалов (табл. 2, 3) [2]. При изготовлении экспериментальных образцов, наполненных диатомитом, было выявлено, что пористость (P) изменяется в пределах от 37 (состав № 3) до 72% (состав № 7). Предел прочности при сжатии колеблется в пределах от 0,522 (состав № 7) до 2,400 МПа (состав № 6). Состав № 3 имеет предел прочности при сжатии 2,351 МПа. Средняя плотность варьируется от 540 (состав № 7) до 1096 кг/м³ (состав № 3). Коэффициент однородности α находится в пределах от 0,077 (состав № 4) до 0,490 (состав № 1). Составы № 3, 7 и 6 имеют коэффициенты однородности, равные, соответственно, 0,191, 0,029 и 0,410. Коэффициент микропористости K_m варьируется в пределах от 0,006 (состав № 8) до 0,300 (составы № 7 и 2). Составы № 3 и 6 имеют коэффициенты микропористости равные 0,013 и 0,007. Максимальный объем открытых пор обнаружен у состава 4 (58,87%), минимальный – у состава № 1 (45,33%). У составов № 3, 7 и 6 объем открытых пор W_0 , равен 48,16; 58,70 и 48,04%.

Таблица 2.

План эксперимента модифицированных цементных композиций
с наполнителем из диатомита

№ опыта	Матрица планирования		Свойства композиций					
	X_1	X_2	$R_{сж}$, МПа	P , %	ρ , кг/м ³	α	K_m	W_0 , %
1	0	0	1,147	52	905	0,143	0,014	52,40
2	1	1	1,367	45	1000	0,213	0,021	46,79
3	-1	1	0,522	72	540	0,029	0,030	58,70
4	-1	-1	0,622	53	850	0,490	0,008	45,33
5	1	-1	2,351	37	1096	0,191	0,013	48,16
6	1	0	2,400	45	1027	0,410	0,007	48,04
7	0	1	1,839	49	920	0,296	0,006	49,11
8	-1	0	0,810	57	777	0,077	0,018	58,87
9	0	-1	0,908	50	930	0,089	0,030	57,08

Таблица 3.

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Исследуемые факторы	Уровни варьирования		
	1	0	-1
Степень наполнения от массы цемента, X_1 , %	60	45	30
Пеноконцентрат / цемент, X_2	1 : 50	1 : 54,5	1 : 60

Повышенную прочность состава № 6 (2,4 МПа) по сравнению с остальными при более низкой средней плотности можно объяснить более однородной макропористой структурой с

пониженным объемом открытых пор. Качественный теплоизоляционный материал должен иметь низкую плотность и высокую пористость, что соответствует экспериментальным образцам № 7 ($\rho = 540 \text{ кг/м}^3$, $P = 72\%$).

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение степени наполнения от 30 до 60% приводит к увеличению прочностных характеристик пеноматериалов. С увеличением количества пеноконцентрата до П/Ц = 1 : 50 (среднее П/Ц = 1 : 54,5) или с его уменьшением до П/Ц = 1 : 60 при постоянном отношении воды в пене, равном 1 : 36, происходит уменьшение показателя прочности.

Так как качественный теплоизоляционный материал должен обладать наименьшей плотностью, то, согласно планированию эксперимента, оптимальный состав выявлен при 30%-ом наполнении диатомитом и П/Ц = 1 : 50,4. Уменьшение или увеличение этих характеристик приводит к увеличению плотности материалов. Пористость же при наименьшем значении средней плотности будет максимальной. Для улучшенного качества пенобетонов необходимо добиваться высокого коэффициента микропористости и однородности пор. Наименьшему коэффициенту теплопроводности должно соответствовать большее количество замкнутых пор. Эксперимент не выявил большого разброса в значениях объемов открытых пор во всех образцах. Наибольшее значение соответствует $\approx 59\%$ (состав № 8). Таким образом, проанализировав все характеристики вышеприведенных композитов, выявлен оптимальный состав № 7, наполненный диатомитом.

На основании экспериментальных исследований и их анализа можно сделать вывод, что в качестве наполнителя наиболее целесообразно использовать диатомит. Полученные теплоизоляционные материалы рекомендуется применять в качестве конструктивных пенобетонов для ограждающих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейкин А. Е., Чеховский А. Е., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
2. Куприяшкина Л. И. Наполненные цементные композиции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 180 с.

СИНЮКОВ О. А., НИЗИНА Т. А., МИХАЙЛОВА В. М.
ВЛИЯНИЕ МЕСТНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований составов лакокрасочных покрытий на основе акриловых связующих, содержащих местные наполнители Республики Мордовия (диатомит и доломит). Выявлены оптимальные составы, обладающие высокими значениями сухого остатка и укрывистости высушенной пленки.

Ключевые слова: водно-дисперсионная краска, акриловое связующее, наполнитель, диатомит, доломит, сухой остаток, укрывистость.

SINYUKOV O. A., NIZINA T. A., MIKHAILOVA V. M.
THE EFFECTS OF MORDOVIA REPUBLIC LOCAL FILLERS
ON THE CHARACTERISTICS OF WATER-DISPERSIVE PAINT COATINGS

Abstract. The article presents the test results of paint coating compositions based on acrylic binders, containing the local fillers of Mordovia Republic – diatomite and dolomite. The study showed the optimal compositions with high values of dry residue and spreading capacity of dried film.

Keywords: water-dispersive paint, acrylic binder, filler, diatomite, dolomite, dry residue, spreading capacity.

В последние годы все большее внимание уделяется архитектурной выразительности фасадов зданий, что привело к увеличению спроса на материалы, предназначенные для их отделки, в том числе и на лакокрасочные покрытия [1; 2]. Высокая стоимость энергоресурсов, рост цен на сырье, транспортные расходы сырья и готовой продукции сказываются на повышении стоимости материалов российских производителей. Для снижения себестоимости лакокрасочной продукции целесообразно использовать в качестве наполнителей местные сырьевые ресурсы [3–5].

Наиболее известным и давно применяемым наполнителем для лакокрасочных систем является мел. Однако в Мордовии нет залежей мела, пригодного для изготовления красок, и его приходится завозить из других регионов. В то же время в Республике расположены крупные запасы диатомита и доломита, что позволяет использовать их в составах лакокрасочных покрытий [3; 5].

Физико-механические и эксплуатационные характеристики краски предопределяются составом и свойствами ее компонентов. Как известно, водно-дисперсионная краска

представляет собой водную дисперсию пленкообразователя (связующего) с наполнителями, пигментами и различными специфическими добавками (эмульгаторы, стабилизаторы, загустители, антивспениватели, антисептики и др.) [6]. Количественное соотношение между связующим и пигментно-наполнительной частью в значительной мере определяет физико-механические и защитные свойства покрытия.

Пигменты и наполнители в лакокрасочных покрытиях выполняют разнообразные функции, главными из которых являются придание цвета, непрозрачности, повышение прочностных и защитных свойств. При выборе пигментов и наполнителей водно-дисперсионных красок возникает ряд задач, связанных с необходимостью обеспечения их химической и коллоидно-химической устойчивости в водной среде, должной дисперсности, а также с подбором уровня наполнения (т. е. оптимального содержания в покрытии пигментов и наполнителей). Для пигментирования водно-дисперсионных красок пригоден ограниченный набор пигментов и наполнителей, характеризующихся повышенной нерастворимостью и химической инертностью в водной среде, минимальным содержанием водорастворимых примесей, стойкостью в слабокислых (или щелочных) средах.

Долгое время считалось, что наполнители в лакокрасочных материалах (ЛКМ) играют пассивную роль в отношении свойств лакокрасочной композиции. На сегодняшний день стало очевидно, что наполнители оказывают существенное влияние на такие свойства ЛКМ, как распределение частиц пигмента, структуру и реологические свойства краски (розлив и вязкость) [7]. Некоторые, так называемые, активные наполнители способны даже усиливать прочностные и защитные свойства покрытий, а не просто «разбавлять» основной пигмент.

В данной работе была поставлена цель – проанализировать влияние местных для Республики Мордовии наполнителей (диатомита и доломита) на характеристики водорастворимых акриловых красок. В ходе экспериментальных исследований также варьировалось количество акриловой дисперсии и пигмента – диоксида титана; базовым наполнителем был выбран мел. В качестве плана эксперимента использовался план вида «состав-свойство» (см. табл. 1). Исследуемыми факторами послужили количественные содержания: x_1 – акриловой дисперсии «Акрэмос-101»; x_2 – диоксида титана TiO_2 , а также доля в смеси наполнителей: мела (v_1), диатомита (v_2) и доломита (v_3), причем $v_1 + v_2 + v_3 = 1$ и $0 \leq v_i \leq 1$. Содержание других компонентов смеси (загустителей, пеногасителей, биоцидных добавок и т.д.) принималось постоянным для всех составов. Уровни варьирования переменных факторов и план эксперимента приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.

План экспериментального исследования

№ опыта	В нормализованных факторах					В натуральных факторах, масс. час.				
	v_1	v_2	v_3	x_1	x_2	мел	диатомит	доломит	Акрэмос-101	оксид титана
1	1	0	0	-1	-1	40	0	0	10	10
2	0	1	0	-1	-1	0	20	0	10	10
3	0	0	1	-1	-1	0	0	40	10	10
4	0.5	0.5	0	-1	0	20	10	0	10	15
5	0	1	0	-1	1	0	20	0	10	20
6	0.5	0	0.5	-1	1	20	0	20	10	20
7	1	0	0	0	1	40	0	0	20	20
8	0	0	1	0	1	0	0	40	20	20
9	0.5	0	0.5	0	0	20	0	20	20	15
10	1/3	1/3	1/3	0	-1	13.33	6.67	13.33	20	10
11	1	0	0	1	-1	40	0	0	30	10
12	0	1	0	1	-1	0	20	0	30	10
13	0	0	1	1	-1	0	0	40	30	10
14	0	0.5	0.5	1	0	0	10	20	30	15
15	0.5	0.5	0	1	-1	20	10	0	30	10
16	0.5	0	0.5	1	1	20	0	20	30	20
17	0	0	1	1	1	0	0	40	30	20

Таблица 2.

Уровни варьирования переменных факторов

Варьируемые компоненты красок, мас.час.	Уровни варьирования			Максимальное содержание наполнителей, мас.час.		
	-1	0	+1			
дисперсия «Акрэмос-101»	10	20	30	мел	диатомит	доломит
оксид титана	10	15	20	40	20	40

За эталон водно-дисперсионных красок при проведении сравнительных испытаний принималась отечественная ВД-АК-111 (ГОСТ 28196-89). Данная краска предназначена для наружной и внутренней окраски зданий и сооружений по кирпичным, бетонным, оштукатуренным и другим пористым поверхностям. Покрытия на основе водно-дисперсионной краски ВД-АК-111 охраняют защитные свойства не менее 5 лет в условиях умеренного климата.

Основные характеристики краски ВД-АК-111:

- внешний вид высохшей пленки (ГОСТ 28196-89) – ровная однородная матовая поверхность;
- массовая доля нелетучих веществ (сухой остаток) (ГОСТ 17537-72) – 47-52%;
- pH краски (ГОСТ 21119.3-75) – 8-9;
- условная вязкость (ВЗ-246) с диаметром сопла 4 мм (ГОСТ 8420-74) – не менее 12 с;
- укрывистость высушенной пленки (ГОСТ 8784 -75) – не более 100 г/м²;

- степень перетира (ГОСТ 6589-74) – не более 60 мкм;
- время высыхания до степени 3 (ГОСТ 19007-73) при 20° С – не более 1 ч.

При испытании полученных композиций, составы которых приведены в табл. 1, установлено, что степень перетира (не более 60 мкм), pH (8÷9) и время высыхания до степени 3 (менее 1 часа) для всех красок находятся в норме (ГОСТ 28196-89). Для анализа массовой доли нелетучих веществ (сухого остатка), укрывистости высушенной пленки и расхода краски вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм для всех составов выдерживалась в пределах 22-27 с. (ГОСТ 28196-89).

По результатам проведенных исследований были определены коэффициенты полиномиального уравнения:

$$y = b_1 \cdot v_1 + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 + b_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + b_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + b_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + b_{123} \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 + d_{11} \cdot v_1 \cdot x_1 + d_{21} \cdot v_2 \cdot x_1 + d_{31} \cdot v_3 \cdot x_1 + d_{12} \cdot v_1 \cdot x_2 + d_{22} \cdot v_2 \cdot x_2 + d_{32} \cdot v_3 \cdot x_2 + c_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + c_{11} \cdot x_1^2 + c_{22} \cdot x_2^2 \quad (1)$$

и построены трехмерные графические зависимости, позволяющие проследить влияние варьируемых факторов (рис. 1–3) на характеристики ЛКМ.

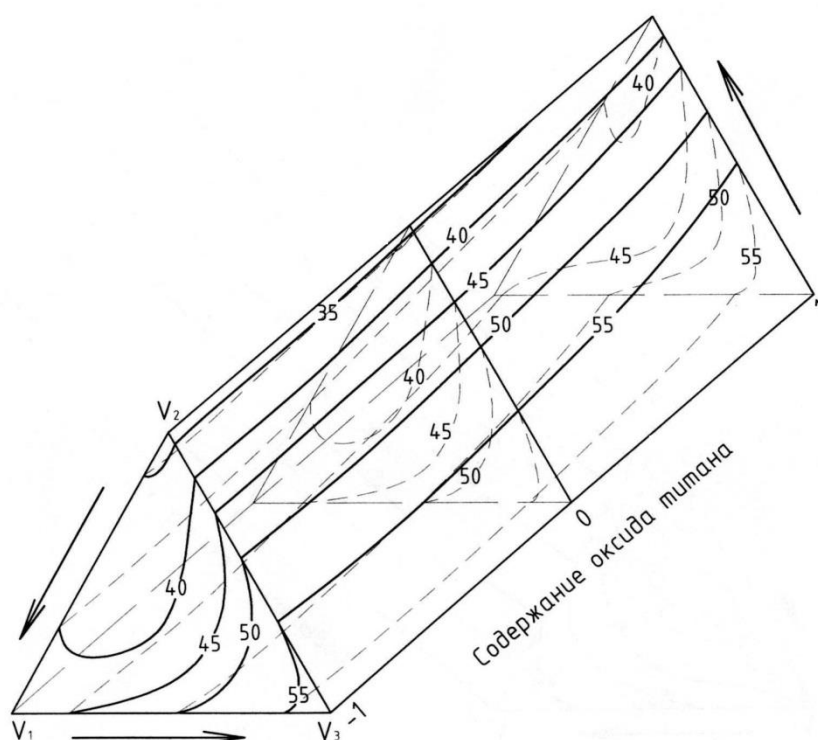


Рис. 1. Изменение сухого остатка ЛКМ ($x_1 = -1$) в зависимости от структурных параметров (x_1 – акриловая дисперсия «Акрэмос-101»; x_2 – диоксид титана TiO_2 ; v_1 – мел; v_2 – диатомит; v_3 – доломит).

Одним из основных параметров красок является сухой остаток (массовая доля нелетучих веществ). Установлено, что для составов, наполненных мелом и доломитом, происходит повышение значений сухого остатка при увеличении в краске количества

акриловой дисперсии «Акрэмос-101». Изменение доли пигмента (диоксида титана) не оказывает заметного влияния на величину сухого остатка. Незначительное увеличение данного параметра наблюдается для композиций, наполненных диатомитом. На графиках, представленных на рис. 1–3, хорошо видно влияние вида наполнителя на массовую долю нелетучих веществ. Так, краски, в которых в качестве наполнителя используется диатомит и комбинация «мел + диатомит», обладают наименьшим сухим остатком.

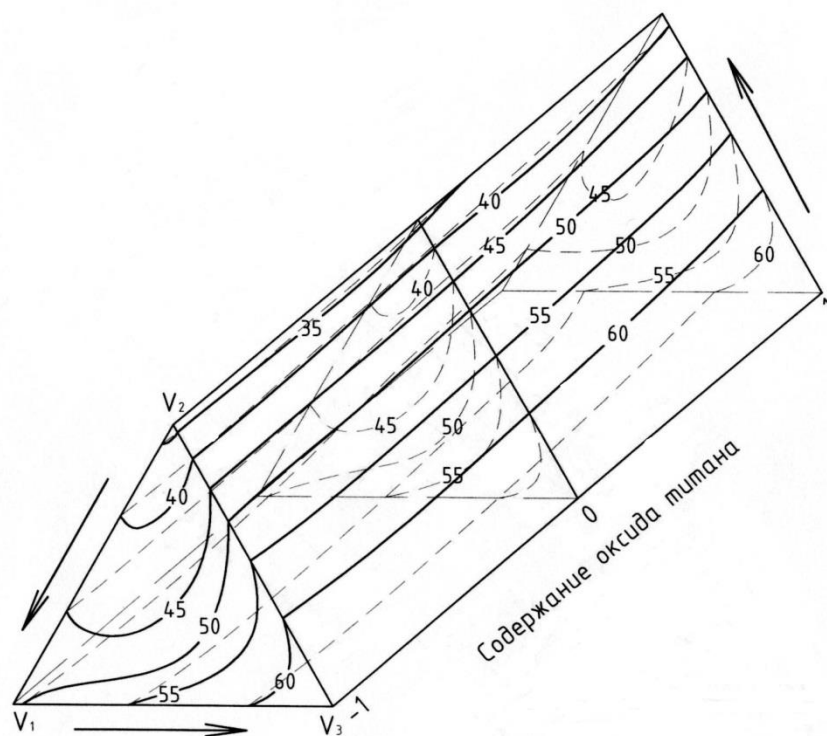


Рис. 2. Изменение сухого остатка ЛКМ ($x_1 = 0$) в зависимости от структурных параметров (x_1 – акриловая дисперсия «Акрэмос-101»; x_2 – диоксид титана TiO_2 ; v_1 – мел; v_2 – диатомит; v_3 – доломит).

Учитывая требования, предъявляемые к подобным краскам, минимальное значение сухого остатка должно быть не ниже 47–52%. Отбрасывая все составы, имеющие более низкие значения, можно сделать вывод, что краски с наполнителями доломит, мел-доломит (50–50%) и диатомит-доломит (50–50%) удовлетворяют предъявляемым требованиям. Композиции, наполненные мелом, имеют сухой остаток, превышающий минимально-допустимый уровень только при содержании акриловой дисперсии более 20 мас. час. ($x_1 \geq 0$).

Наименьшие (не удовлетворяющие требованиям) значения данного параметра получены для красок, содержащих минимальное количество акриловой дисперсии ($x_1 = -1$), доломита менее 20–37% и мела, соответственно, более 63–80%. Практически аналогичная ситуация возникает и при анализе совместного влияния наполнителей доломита и диатомита.

В данном случае краски с оптимальным сухим остатком должны содержать доломита не менее 22÷34%.

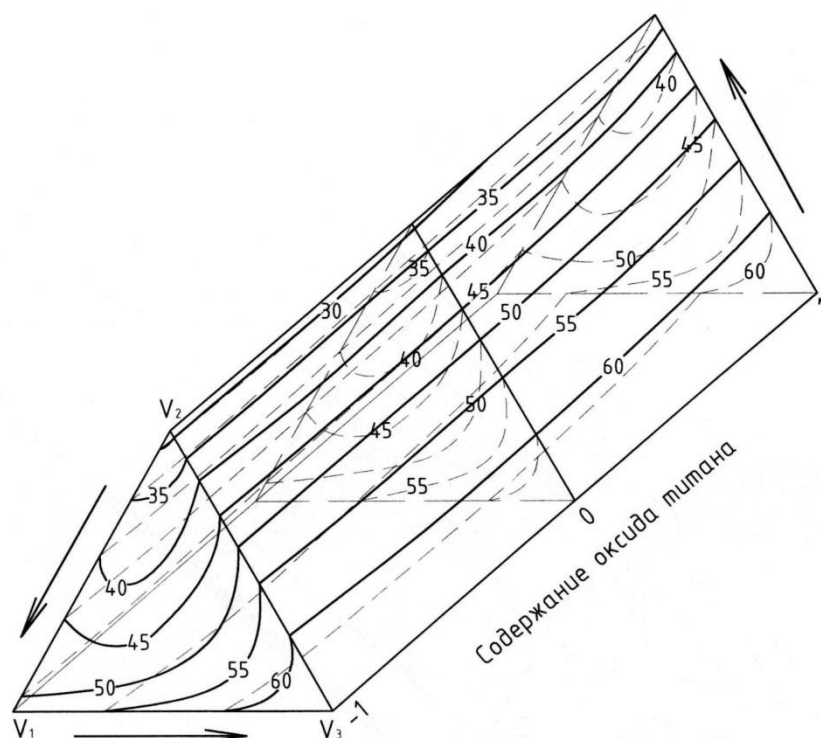


Рис. 3. Изменение сухого остатка ЛКМ ($x_1 = 1$) в зависимости от структурных параметров (x_1 – акриловая дисперсия «Акрэмос-101»; x_2 – диоксид титана TiO_2 ; v_1 – мел; v_2 – диатомит; v_3 – доломит).

На основе экспериментальных исследований установлено, что если в качестве наполнителей использовать диатомит и мел, то полученные краски имеют достаточно низкое содержание нелетучих веществ, еще больше снижающееся при увеличении в составе доли диатомита. В этом случае краски с допустимым сухим остатком можно получить только при достаточно большом содержании акриловой дисперсии $x_1 \geq 0$ и оксида титана $x_2 \geq 0$, а также минимальном количестве (до 12÷30%) диатомита и максимальном (более 70÷88%) мела.

В ходе экспериментального исследования также проводился анализ расхода краски, оцениваемой параметром «укрывистость» с применением черно-белой шахматной доски по ГОСТ 8784-75. Выявлено, что для всех исследуемых составов укрывистость достигается при нанесении двух слоев лакокрасочного покрытия. При этом наибольший расход краски, нанесенной в два слоя (в пересчете на сухую пленку), при минимальном количестве оксида титана наблюдался для композиций, наполненных доломитом. Повышение в смесях доли оксида титана приводит к увеличению расхода краски для составов, содержащих мел и комбинации наполнителей «мел + диатомит».

Композиции, содержащие в своем составе только доломит, обладают наименьшим

разбросом характеристик при различных сочетаниях количества акриловой дисперсии и пигмента. Наибольшие значения расхода краски для композиций, наполненных мелом, получают при максимальном содержании оксида титана. Увеличение количества акриловой дисперсии в составе лакокрасочной продукции, наполненной мелом и доломитом, при малом содержании отбеливающего пигмента приводит к значительному повышению укрывистости. С повышением доли оксида титана влияние степени наполнения значительно снижается. При увеличении доли мела в комбинации «мел + доломит», а также диатомита в комбинации «диатомит + доломит» при низких значениях пигмента происходит значительное уменьшение укрывистости ЛКМ. При высоком содержании в акриловых красках оксида титана изменение укрывистости практически не наблюдается.

Таким образом, использование в качестве наполнителей акриловых красок доломита и диатомита в оптимальных соотношениях позволяет получить составы с требуемой укрывистостью и массовой долей нелетучих веществ, что подтверждает целесообразность использования местных наполнителей Республики Мордовия для производства водно-дисперсионных красок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толмачев И. А., Петренко Н. А. Водно-дисперсионные краски строительного назначения // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1994. – № 6. – С. 29.
2. Кислова Ю. Е., Воронина Е. А., Кардаш П. В. Состояние и перспективы российского рынка акриловых дисперсий и водно-дисперсионных лакокрасочных материалов на их основе // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2005. – № 12. – С. 4–13.
3. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
4. Селяев В. П., Низина Т. А., Зубанкова Н. О. Исследование влияния структурирующих добавок на декоративные характеристики лакокрасочных покрытий // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – Вып. 8. – Тула, 2005. – С. 137–141.
5. Низина Т. А., Селяев В. П., Зубанкова Н. О. Водно-дисперсионная краска. Патент на изобретение № 2348665 от 12.11.2007.
6. Толмачев И. А., Верхованцев В. В. Новые водно-дисперсионные краски. – Л.: Химия, 1979. – 200 с.
7. Ермилов П. И., Индейкин Е. А., Толмачев И. А. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы. – Л.: Химия, 1987. – 200 с.