

# ВЕСТНИК

ДОНБАССКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ



**ВЫПУСК 2021-1(147)**

**СОВРЕМЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры”

# **ВЕСТНИК**

**Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Издается с декабря 1995 года  
Выходит 8 раз в год

**Выпуск 2021-1(147)**

**СОВРЕМЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

Макеевка 2021

ДООУ ВПО “Донбаська національна академія  
будівництва і архітектури”

# **ВІСНИК**

**Донбаської національної академії  
будівництва і архітектури**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

Видається з грудня 1995 року  
Виходить 8 разів на рік

**Випуск 2021-1(147)**

**СУЧАСНІ  
БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ**

Макіївка 2021

## **Основатель и издатель**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Свидетельство о регистрации средства массовой информации серия ААА № 000094

выдано 17.01.2017 г. Министерством информации ДНР

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации.

В случае использования материалов ссылка на «Вестник ДонНАСА» является обязательной.

Выпускается по решению ученого совета

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Протокол № 5 от 25.01.2021 г.

## **Редакционный совет:**

Горохов Е. В., д. т. н., профессор – главный редактор;

Мущанов В. Ф., д. т. н., профессор – зам. гл. редактора (научный редактор);

Югов А. М., д. т. н., профессор – технический редактор;

Братчун В. И., д. т. н., профессор – ответственный редактор выпуска.

## **Редакционная коллегия:**

Братчун В. И., д. т. н., профессор;

Горохов Е. В., д. т. н., профессор;

Ефремов А. Н., д. т. н., профессор;

Зайченко Н. М., д. т. н., профессор;

Левин В. М., д. т. н., профессор;

Лобов М. И., д. т. н., профессор;

Любомирский Н. В., д. т. н., профессор;

Мущанов В. Ф., д. т. н., профессор;

Петраков А. А., д. т. н., профессор;

Фролова С. А., к. х. н., доцент;

Югов А. М., д. т. н., профессор;

Ядыкина В. В., д. т. н., профессор.

Корректоры Л. М. Лещенко, Е. В. Гнездилова

Программное обеспечение С. В. Гавенко

Компьютерная верстка Е. А. Солодкова

Подписано к выпуску 15.02.2021

## **Адрес редакции и издателя**

86123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Телефоны: +38(062) 343-7033; +38(062) 343-7028

E-mail: [vestnik@donnasa.ru](mailto:vestnik@donnasa.ru), <http://vestnik.donnasa.ru>

Приказом МОН ДНР № 464 от 02.05.2017 г. журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Выпущено в полиграфическом центре

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

86123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2

### **Засновник і видавець**

ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
Свідоцтво про реєстрацію засобу масової інформації серія ААА № 000094  
видано 17.01.2017 р. Міністерством інформації ДНР

Автори надрукованих матеріалів несуть відповідальність за вірогідність наведених відомостей, точність даних за цитованою літературою і за використання в статтях даних, що не підлягають відкритій публікації.

У випадку використання матеріалів посилання на «Вісник ДонНАБА» є обов'язковим.

Випускається за рішенням Вченої ради  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
Протокол № 5 від 25.01.2021 р.

### **Редакційна рада:**

Горохов Є. В., д. т. н., професор – головний редактор;  
Мущанов В. П., д. т. н., професор – заст. гол. редактора (науковий редактор);  
Югов А. М., д. т. н., професор – технічний редактор;  
Братчун В. І., д. т. н., професор – відповідальний редактор випуску.

### **Редакційна колегія:**

Братчун В. І., д. т. н., професор;	Любомирський М. В., д. т. н., професор;
Горохов Є. В., д. т. н., професор;	Мущанов В. П., д. т. н., професор;
Єфремов О. М., д. т. н., професор;	Петраков О. О., д. т. н., професор;
Зайченко М. М., д. т. н., професор;	Фролова С. О., к. х. н., доцент;
Левін В. М., д. т. н., професор;	Югов А. М., д. т. н., професор;
Лобов М. І., д. т. н., професор;	Ядикіна В. В., д. т. н., професор.

Коректори Л. М. Лещенко, О. В. Гнездилова  
Програмне забезпечення С. В. Гавенко  
Комп'ютерне верстання Є. А. Солодкова

Підписано до випуску 15.02.2021

### **Адреса редакції і видавця**

86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2,  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
Телефони: +38(062) 343-7033; +38(062) 343-7028  
E-mail: vestnik@donnasa.ru, <http://vestnik.donnasa.ru>

Наказом МОН ДНР № 464 від 02.05.2017 р. журнал включено до переліку рецензованих наукових видань, в яких повинні бути опубліковані основні наукові результати дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, на здобуття наукового ступеня доктора наук

Випущено у поліграфічному центрі  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2

УДК 625.855.3

**В. И. БРАТЧУН, В. А. БЕСПАЛОВ, О. Н. НАРИЖНАЯ, В. П. ДЕМЕШКИН, Э. Л. РАДЮКОВА**  
ГООУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО ПОРОШКА БЕТОНОВ НА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ РАСТВОРАМИ ОЛИГОМЕРОВ И ПОЛИМЕРОВ**

**Аннотация.** Сорбция компонентов органических вяжущих на поверхности минерального порошка затруднена вследствие его гидрофильности и наличия в глубоких бороздках и капиллярах пузырьков воздуха, которые препятствуют плотному контакту между органическим вяжущим и поверхностью минерального порошка и являются потенциальными очагами разрушения. Показано, что модификация поверхности минерального порошка растворами олигомеров, полимеров, содержащих функциональные группы  $\text{CO}$ ,  $\text{COOH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , например эпоксидными или карбаминоформальдегидными смолами, полимерсодержащими отходами производства эпоксидных смол, позволит эффективно регулировать адгезионно-когезионные свойства дегте-, битумополимерного вяжущего. Структурно-упрочненный слой олигомера или полимера повысит адгезию дегтеполимерного или битумополимерного вяжущего к поверхности активированного минерального порошка вследствие увеличения контактов сегментов пластифицированных надмолекулярных образований полимера (поливинилхлорида, полистирола, полимерсодержащих отходов производства эпоксидных смол и др.) с активными центрами олеофильной поверхности, диффузии макромолекул полимера в слой олигомера, полимера и образований структур подобных катенановым.

**Ключевые слова:** дегте-, битумополимерное вяжущее, поверхностно-активированный олигомером или полимером, содержащим функциональные группы, минеральный порошок, дегте-, асфальто-полимербетон повышенной долговечности.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Свойства бетонов на органических вяжущих с коагуляционным типом контактов определяются прежде всего качеством органического вяжущего и характером взаимодействия на поверхности раздела фаз (ПРФ) органическое вяжущее – минеральный порошок [1–3]. Органические вяжущие (ОВ) характеризуются высокими температурами перехода в упруго-хрупкое состояние ( $-17...-10$  °С) и низкими температурами текучести ( $39...57$  °С), а также отсутствием эластичности и неудовлетворительной адгезией к поверхности минеральных материалов (20 % по ГОСТ 12801) и когезией [4, 5].

В наших работах [6–8] показано, что улучшение качества каменноугольных вяжущих и нефтяных дорожных битумов одновременным воздействием на дисперсионную среду вяжущих и активацией поверхности минеральных порошков растворами олигомеров, полимеров, содержащих функциональные группы, позволит направленно регулировать адгезионно-когезионные свойства органических вяжущих каменноугольного и нефтяного происхождения, находящихся в межзерновом пространстве дегтебетона и асфальтобетона. Это обеспечит долговечность нежёстких покрытий автомобильных дорог, построенных с их использованием.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности поверхностной активации минеральных материалов дегтебетонов и асфальтобетонов концентрированными растворами олигомеров и полимеров, которые содержат функциональные группы ( $\text{CO}$ ,  $\text{COOH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}$ ,  $\text{ROH}$ ).

*Теоретические положения активации поверхности минеральных материалов концентрированными растворами олигомеров и полимеров*

Вероятно, наиболее эффективными модификаторами минерального порошка будут концентрированные растворы олигомеров, которые содержат в своем составе функциональные группы (СО, СООН, NH<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и др.), так как поверхностно-активные компоненты каменноугольных вяжущих и нефтяных дорожных битумов могут вытеснять с поверхности минерального порошка более низкомолекулярные ПАВ. В то же время применение полярных полимеров потребует специальных растворителей.

В качестве олигомеров – модификаторов карбонатных и кварцитосодержащих пород можно использовать полиэтиленоксид, эпоксидную смолу, полимерсодержащие отходы производства эпоксидных смол, полиэтиленкарбонат, мочевино-формальдегидную смолу, кубовые остатки ректификации стирола и др.

Реакционная способность твердых тел при их диспергировании возрастает за счет возникновения новых поверхностей, изменения структуры поверхностного слоя, флуктуации ионов, образования свободных радикалов, ионов, которые легко вступают в химическое взаимодействие с обычными насыщенными молекулами.

Так, измельчение кальцита приводит к появлению на поверхности Ca<sup>2+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Наряду с явлением аморфизации выделяется CO<sub>2</sub> и Ca(OH)<sub>2</sub>.

Разрушение же кварца сопровождается разрывом Si–О связей. Новая поверхность приобретает положительные и отрицательные заряды.

В свою очередь, при механических воздействиях на олигомеры и полимеры, например при помолу, из-за неравномерного распределения внутренних напряжений или локализации энергии удара на отдельных участках цепи олигомера, полимера возникают критические напряжения и происходит разрыв ковалентных связей, что также приводит к образованию активных участков – свободных радикалов, ионов или ион-радикалов. При этом механодеструкция идет, главным образом, связей C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>2</sub>–CH<sub>3</sub>, C–N, C–H, C–O, N–H, у которых энергия диссоциации составляет 263, 297, 347, 351 и 401 кДж/моль соответственно. Так, энергия связи C–C в пересчете на механическую работу составляет 6·10<sup>-9</sup> кг, действующая на пути 1·10<sup>-11</sup> м, и ничтожно мала по сравнению с энергией, затрачиваемой при самых мягких условиях переработки олигомеров и полимеров.

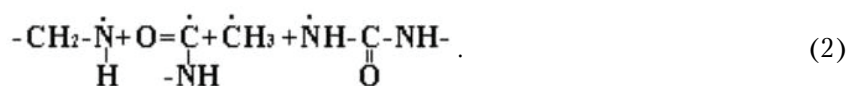
Благодаря незначительной концентрации макрорадикалов, образующихся при механической деструкции (10<sup>-5</sup>...10<sup>-6</sup> моль/л), скорость рекомбинации их очень низка, так как

$$\bar{v} = K[R^*]^2, \tag{1}$$

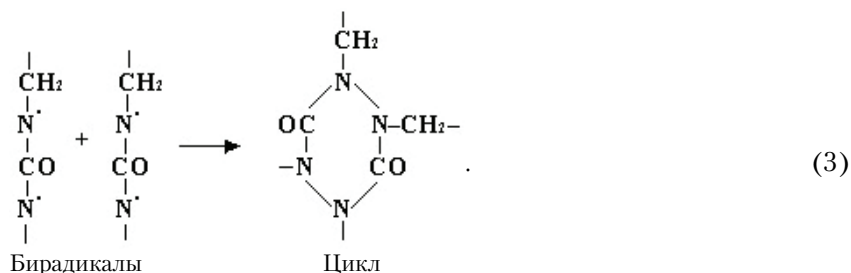
где  $K$  – константа реакции;  
 $R^*$  – радикал.

В связи с этим можно представить следующие превращения, осложняющие сорбцию олигомеров, например, на поверхности минерального порошка при механоактивации последнего в шаровой мельнице.

В частности, в мочевино-формальдегидной смоле прежде всего рвутся связи C–N с образованием радикалов:

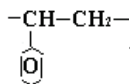


Перегруппировка этих радикалов в рекомбинации может привести к разветвлению молекул олигомера и к их слиянию, циклообразованию и узлообразованию



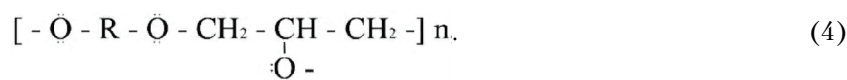
Подобные радикальные и бирадикальные частицы могут образовываться и при механико-химической активации минерального порошка в присутствии олигомерной ЭД-смолы или отходов их производства. В этом случае прежде всего рвутся связи C – C, C – H и C – O, что также приведет к разветвлению, слиянию, цикло- и узлообразованию.

В кубовых остатках ректификации стирола рвутся связи C – H и C – C фрагмента



При измельчении минеральных материалов в среде концентрированного раствора олигомера последний будет сорбироваться как на поверхности, так и проникать внутрь зародышевых микро-трещин, способствуя диспергированию частиц (эффект П. А. Ребиндера). Образующиеся адсорбционно-сольватные слои олигомера будут препятствовать сцеплению активированных частиц порошка в агрегаты.

Кроме взаимодействия активных участков новых поверхностей минеральных частиц и олигомеров по радикал-радикальному механизму образуются донорно-акцепторные связи. Это обусловлено тем, что полярные олигомеры содержат атомы с неподеленными парами электронов, выступающие в роли доноров. Например, в молекуле эпоксидной смолы донорами являются атомы кислорода



В молекулах мочевино-формальдегидной смолы донорами являются атомы азота и кислорода, а в кубовых остатках ректификации стирола – атомы кислорода. В то же время катионы кальция имеют свободные орбитали (акцепторы), которые при взаимодействии с олигомерами образуют химическую связь за счет обобществления неподеленных пар электронов. Это создает прочную, эластичную, пространственную матрицу дегтеполимербетона и асфальтобетона, которая и определяет деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированных дегтеполимербетонов и асфальтополимербетонов.

Энергия общей адсорбции может быть представлена как:

$$E_A = A \cdot \Phi + B \cdot X, \quad (5)$$

где A и B – константы;

Φ и X – вклад физических и химических взаимодействий на поверхности раздела фаз «олигомер – минеральный порошок» соответственно.

Можно предположить, что массовые концентрации модификаторов минерального порошка, например мочевино-формальдегидной и эпоксидной смол, должны соотноситься между собой также, как и способность их образовывать хемосорбционные (донорно-акцепторные) связи, о чем можно судить по соотношению энергий возможных связей между фрагментами макромолекул мочевино-формальдегидной и эпоксидной смол по отношению к тому же количеству известнякового или кварцевого минерального порошка. Таким критерием может быть отношение:

$$n = \frac{C_{ков}}{C_{ион}}, \quad (6)$$

где n – способность атомов на границе олигомер – минеральный порошок вступать в донорно-акцепторную связь;

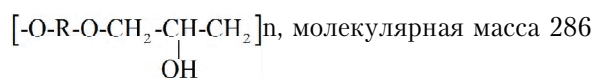
$C_{ков}$  и  $C_{ион}$  – энергия ковалентных и ионных связей соответственно.

Например, при взаимодействии мочевино-формальдегидной смолы ( $C_2H_4N_2O$ , молекулярная масса 72) и известнякового порошка должно образоваться девять связей с катионами кальция, отличающихся степенью ионности и ковалентности. Тогда, используя выражение 6 в расчете на 1 г кальция, вычислена удельная энергия связи на границе раздела  $C_2H_4N_2O - Ca^{2+}$ :

$$\frac{0,5582 \cdot 2 + 0,6793 \cdot 4 + 0,37 \cdot 2 + 0,24 \cdot 1}{0,4418 \cdot 2 + 0,3207 \cdot 4 + 0,63 \cdot 2 + 0,76 \cdot 1} = 1,1492 \text{ (средство к } Ca^{2+}/\text{моль)}.$$



А при взаимодействии с кальцитом эпоксидной смолы



должны образовываться три связи  $\text{Ca}^{2+} - \text{O}$ , степень ионности которых 76 %, ковалентности 24 %. В связи с этим удельная энергия связи фрагмента эпоксидной смолы с 1 г известнякового минерального порошка будет равна

$$\frac{0,24 \cdot 0,3}{0,76 \cdot 0,3} = 0,3158 \text{ (средство с } \text{Ca}^{2+} \text{/моль)}.$$

Таким образом, средство одного фрагмента мочевино-формальдегидной смолы с 1 г  $\text{CaCO}_3$  будет выше, чем средство одного структурного элемента эпоксидной смолы с таким же количеством известнякового порошка в 3,6 раза

$$n = \frac{1,198}{0,3158} = 3,6. \quad (7)$$

В пересчете же средства 1 моля КФ-МТ и ЭД на 1 г  $\text{CaCO}_3$  получено соответственно.

$$1,1498 / 72 = 0,0160 \text{ моль/г}, 0,3158 / 286 = 0,0011 \text{ моль/г}.$$

Следовательно, для достижения одинакового средства с поверхностью минерального порошка эпоксидной смолы потребуется в 15 раз больше ( $n = 0,0160 / 0,0011 = 15$ ).

Можно также предположить, что карбонатные минеральные порошки будут иметь более прочный структурированный слой модификатора, чем кварцевые. Это обусловлено тем, что при взаимодействии, например, мочевино-формальдегидной смолы с поверхностью основных и кислых минеральных порошков может быть реализована хемсорбция по связям  $\text{Ca} - \text{N}$  и  $\text{Ca} - \text{O}$ , а также  $\text{Si} - \text{N}$  и  $\text{Si} - \text{O}$  соответственно. В первых двух вклад энергии физической адсорбции больше, чем в последних, так как степень ионности связей  $\text{Ca} - \text{N}$  (63 %) и  $\text{Ca} - \text{O}$  (76 %) больше, чем  $\text{Si} - \text{N}$  (40,3 %) и  $\text{Si} - \text{O}$  (53,3 %). Поэтому для минеральных порошков из карбонатов кальция и магния – физическая адсорбция олигомеров с функциональными группами  $\text{C} - \text{C}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{C} - \text{N}$  и др. выше, чем для кварцевых (коэффициент А выше).

В то же время формирование адсорбционного слоя, например, дегтеполимерного вяжущего на активированной олигомером поверхности минерального материала должно происходить в условиях конкурентной адсорбции по поверхности минерального порошка – гамма, бета- и альфа-фракций дегтя, а также пластифицированных  $\gamma$ -фракцией макромолекул и надмолекулярных структур полимера.

Каменноугольное вяжущее является хорошим растворителем как поливинилхлорида, так и полистирола, а их растворы – концентрированные (концентрация ПВХ и ПС в каменноугольных дорожных дегтях 1,5–2,0 м. ч.).

Природа растворителя определяет структуру макромолекул полимера в растворе, степень агрегирования, что должно отразиться на кинетике адсорбции, ее величине, прочности связи адсорбционного слоя с поверхностью адсорбента и его структуре.

При одновременном выходе на поверхность модифицированного минерального порошка большого количества макромолекул и надмолекулярных образований адсорбционный слой должен быть заполнен плотно упакованными агрегатами и надмолекулярными образованиями. При этом дегтеполивинилхлоридное вяжущее сформировать на поверхности активированных минеральных порошков слою большей толщины, чем дегтеполиэтиленовое.

Наличие в полистироле ароматических колец должно обеспечивать хорошее смачивание минеральных порошков, активированных мочевино-формальдегидной и эпоксидной смолами и кубовыми остатками ректификации стирола. Макромолекулы и надмолекулярные образования полистирола будут сорбироваться на подложке многими сегментами и вполне возможно, даже при физической сорбции, при числе контактов до 50 следует ожидать высоких значений энергии адсорбции, соответствующих энергии хемсорбции.

В случае применения дегтеполистирольного вяжущего лучшим модификатором поверхности минеральных порошков будут кубовые остатки ректификации стирола. При нагревании (в процессе

производства дегтеполимербетонных смесей) они должны полимеризоваться и образовывать на поверхности минерального порошка прочную и эластичную тонкую пленку, которая имеет молекулярное сродство с пластифицированными фрагментами полистирола. Поэтому на поверхности раздела фаз межмолекулярные взаимодействия должны быть сильными.

Так как на поверхности модифицированного минерального порошка сорбированные узлы и циклы из олигомеров, то при объединении их с ДПВ образуется единая совмещенная система за счет переплетения макромолекул и надмолекулярных структур с разветвленными сшитыми цикло- и узлосодержащими новообразованиями. При этом в общей системе, уже имеющей узлы и сетки, существует вероятность образования новых узлов и сеток по типу катенановых структур.

При температуре объединения дегтеполивинилхлоридного вяжущего 110...115 °С с минеральными материалами ПВХ частично дегидрохлорируется и изменяет свою структуру с выделением паров  $HCl$ , которые способствуют отверждению мочевино-формальдегидной смолы. Это приведет еще к более выраженному образованию в системе структур, подобных катенановым. Не исключены при этом диполь-дипольные взаимодействия функциональных групп и водородные или донорно-акцепторные связи.

Вполне вероятно, что связи в макромолекулах ПВХ и ПС (прежде всего связи С – Н) разрываются, что также приведет к радикал-радикальным взаимодействиям.

Таким образом, в процессе объединения дегтеполимерных вяжущих с активированными олигомерами минеральными материалами адсорбционно-сольватный слой олигомера повысит адгезию модифицированного органического вяжущего к поверхности минерального порошка в результате улучшения его смачиваемости и усиления мегамилекулярного взаимодействия на поверхности раздела; количество контактов сегментов пластифицированных надмолекулярных образований полимера с активными центрами органотфильной поверхности увеличится. При этом возможно образование структур, подобных катенановым. Это создает прочную, эластичную, пространственную матрицу дегтеполимербетона.

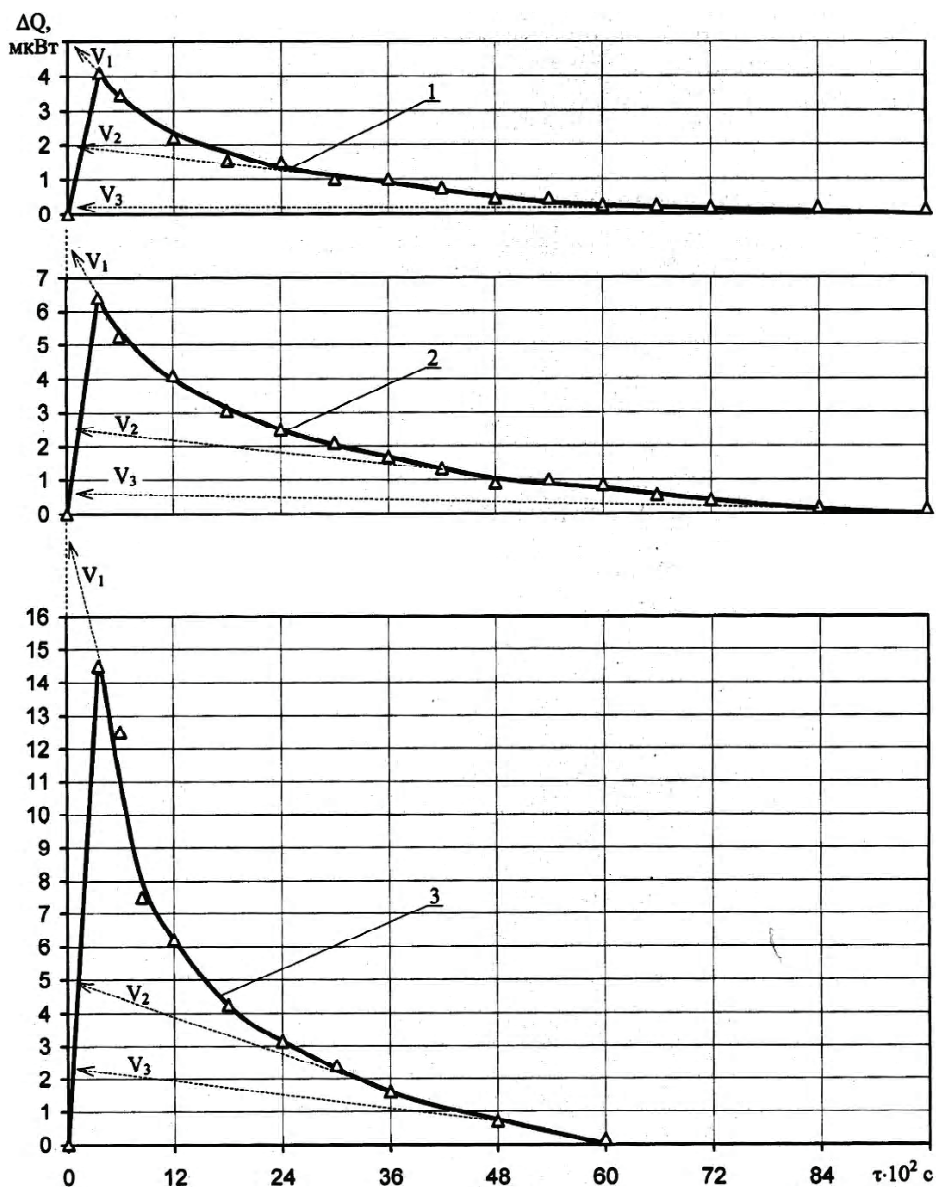
*Исследование поверхностных явлений на модельной системе «дегтеполивинилхлоридное вяжущее вещество, структурированное активированным шламом нейтрализации»*

Процессы, происходящие на поверхности раздела фаз «шлам нейтрализации – полимерсодержащий отход производства эпоксидных смол» и «активированный ПОЭС ШН – дегтеполивинилхлоридное вяжущее», изучали с привлечением специальных методов исследований: калориметрии, дериватографии и ИК-спектроскопии.

Данные калориметрических исследований модельной системы (шлам нейтрализации – эпокси-диановая смола ЭД-16 с содержанием 17 % эпоксидных групп) в изотермическом режиме на калориметре ДАК-1-1А (таблица) свидетельствуют о том, что на кривой тепловой мощности прослеживаются три участка, которым соответствуют определённые скорости реакции  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  (рисунок) ( $V_1$  – начальная скорость реакции – реакция в мономолекулярном слое на границе раздела поверхностей шлама и эпоксидной смолы; второй участок – переменная снижающаяся скорость химической реакции, предположительно в полимолекулярном слое ЭД-16 и в более глубоких мелких порах частиц шлама от  $V_1$  до  $V_2$ ; третий участок характеризуется практически постоянной скоростью  $V_3$ , – вероятно, это диффузионный процесс, обусловленный молекулярной подвижностью непрореагировавших эпоксигрупп в отверждённом на поверхности шлама слое эпоксидиановой смолы, характеризующейся  $TCTT_{отв}$ ).

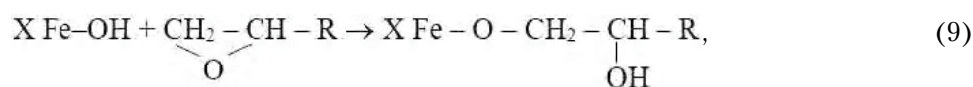
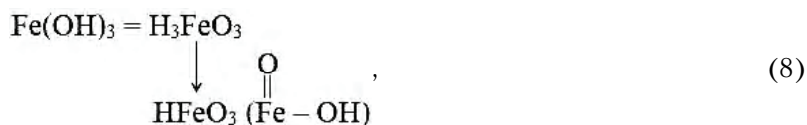
**Таблица** – Скорости реакций амфотерных гидроксидов железной кислоты или гидроксида трёхвалентного железа с эпоксидными группами ЭД-16

Индекс опыта	Температура изотермического прогрева, °С	Соотношение ЭД-16/шлам по массе	Удельная поверхность, $\frac{m^2 \text{ шлама}}{г \text{ ЭД-16}}$	Скорость реакции, мкВт/с		
				$V_1$	$V_2$	$V_3$
1	110	1:1	0,56	2 164	1 357	808
2	110	1:2,5	1,4	3 004	1 518	808
3	150	1:1	0,56	5 200	1 615	808



**Рисунок** – Изменение тепловой мощности  $\Delta Q$  системы «шлам нейтрализации – эпоксиановая смола ЭД-16 с содержанием 17 % эпоксидных групп» в изотермическом режиме от времени  $\tau$ : 1 – температура изотермического прогрева  $110^\circ\text{C}$ , содержание ЭД-16 (шлам по массе 1:1); 2 – температура изотермического прогрева  $110^\circ\text{C}$ , содержание ЭД-16 (шлам по массе 1:2,5); 3 – температура изотермического прогрева  $150^\circ\text{C}$ , содержание ЭД-16 (шлам по массе 1:1).

Небольшое ускорение химической реакции с повышением температуры от  $110$  до  $150^\circ\text{C}$  изотермического прогрева (максимум для  $V_1$  в 2,4 раза выше) свидетельствует о диффузионном характере всех стадий реакции. Можно предположить, что основу процесса составляет взаимодействие амфотерных гидроксидов железной кислоты или гидроксида трёхвалентного железа с эпоксигруппами ЭД-16.



где X – поверхность шлама;  
R – остаток ЭД-16.

Хотя нельзя исключить каталитических процессов.

Сопоставление  $V_1$  для опытов № 1 и № 2, отличающихся величиной поверхности контакта реагентов  $\frac{S(2)}{S(1)} = \frac{1,40}{0,56} = 2,5 \left( \frac{V_1(2)}{V_2(1)} = \frac{3004}{2164} = 1,4 \right)$ , свидетельствует о том, что первоначально в химической реакции участвует только  $1,4/2,5 \cdot 100 = 56$  % поверхности шлама нейтрализации травильных растворов (на поверхности шлама существуют недоступные поры).

Существование стадии процесса с переменной скоростью свидетельствует о том, что реакционные группы в этом слое расходуются и  $V_1$  снижается до  $V_2$ . Сопоставление скорости  $V_2$  позволяет предположить проникновение молекул ЭД-16 в более глубокие поры частиц шлама нейтрализации (происходит некоторое увеличение реакционной поверхности). А постоянство  $V_3$  свидетельствует о том, что процесс идёт в прилегающем к поверхности отверждённом частично слое полимера с непрореагировавшими реакционными эпоксигруппами. Реакция идёт в слое эпоксидного полимера за счёт молекулярной подвижности подшитых к полимерной матрице эпоксигрупп.

Значение  $V_3$  практически остаётся неизменным и не зависит от межфазной поверхности и температуры. Это свидетельствует о протекании химической реакции не на поверхности шлама, а в полимолекулярном поверхностном слое эпоксидного полимера при одинаковой молекулярной подвижности непрореагировавших эпоксигрупп (рисунок).

Толщину слоя эпоксидиановой смолы, в котором протекает химическая реакция, можно определить следующим образом. Количество тепла, выделившегося в ходе химической реакции (опыт № 3, температура изотермического прогрева  $150$  °С, таблица).

$$G = B \cdot S \cdot V^{-1} = 28,45 \cdot 10^{-6} \cdot 6\,244 \cdot 60 = 10,66 \text{ Дж}, \quad (10)$$

где  $B = 28,45 \cdot 10^{-6}$  Дж/(мм·с) – постоянная калориметра;  
 $S = 6\,244$  мм<sup>2</sup> – площадь под кривой, рисунок (3);  
 $V = 60$  мм/ч =  $1/60$  мм/с – скорость диаграммной ленты самописца.

Количество прореагировавших эпоксигрупп в навеске опыта № 3:

$$\frac{G}{Q} = \frac{10,66}{113\,000} = 0,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{мкВт}}{\text{кДж (моль} \cdot \text{э.г.)}}, \quad (11)$$

где  $Q = 113$  кДж/(моль·э. г.) – тепловой эффект раскрытия эпоксигрупп.

Так как в использованной ЭД-16 содержится

$$n = \frac{1 \cdot 0,17}{43} = 0,00395 \frac{\text{моль} \cdot \text{э.г.}}{\text{г смолы}}, \quad (12)$$

то прореагировало в опыте № 3

$$\frac{0,9 \cdot 10^{-4}}{0,00395} = 0,0228 \text{ г ЭД-16.}$$

Поверхность, на которой протекает химическая реакция, в опыте № 3 равна:

$$S_3 = b \cdot S_3 = 0,5020 \cdot 0,56 = 0,281 \text{ м}^2, \quad (13)$$

где  $b = 0,5020$  г – масса навески в опыте № 3;

$S_3$  – удельная реакционная поверхность,  $\frac{\text{м}^2 \text{ шлама}}{\text{г ЭД-16}}$  (таблица).

Удельный расход смолы  $X_s = \frac{0,0228}{0,281} = 0,081$  г/м<sup>2</sup>.

Толщина слоя эпоксидной смолы, в котором происходит реакция (приведена к  $25$  °С):

$$h = \frac{X_s}{\rho_{25}} = \frac{0,081}{1,155 \cdot 10^{-6}} = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 70 \text{ нм}, \quad (14)$$

где  $\rho = 1,155$  г/см<sup>3</sup> – плотность ЭД-16 при  $25$  °С.

Таким образом, в слое, в котором происходит химическая реакция, можно уложить порядка сотни молекул эпоксидной смолы (диаметр полимерной цепи 0,6 нм). Однако более вероятно глобулярное строение этого слоя включает по толщине от 1 до 6 глобул (размер глобул 0,015...0,045 мкм).

## ВЫВОД

1. Теоретически показано, что наиболее эффективными модификаторами поверхности минерального порошка асфальто- и дегтебетонов являются концентрированные растворы олигомеров, которые содержат в своем составе функциональные группы (СО, СООН, NH<sub>2</sub>, и др.), так как поверхностно-активные вещества каменноугольных дорожных дегтей и нефтяных дорожных битумов могут вытеснять с поверхности минерального порошка более низкомолекулярные ПАВ.

2. Экспериментально с использованием калориметрии установлено, что при поверхностной активации шламов нейтрализации сталепроволочно-канатных заводов (ШПС) полимерсодержащими отходами производства эпоксидных смол (ПОЭС) и при использовании дегтеполивинилхлоридного вяжущего на поверхности раздела фаз в интервале температур 110...150 °С идет химическое взаимодействие амфорных гидроксидов железной кислоты ШМС с эпоксигруппами ЭД-16. Слой, в котором происходит химическая реакция, составляет по толщине от 1 до 6 глобул (диаметр глобул 0,015...0,450 мкм).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожный асфальтовый бетон : учебник / Л. Б. Гезенцев, Н. В. Горелышев, А. М. Богуславский, И. В. Королёв. – Москва : Транспорт, 1985. – 350 с. – Текст : непосредственный.
2. Золотарев, В. А. Перспективы повышения долговечности асфальтобетона / В. А. Золотарев. – Текст : непосредственный // Автомобильный транспорт и дорожное хозяйство на рубеже 3-го тысячелетия. – Харьков : ХНАДУ, 2000. – С. 58–51.
3. Ярцев, В. П. Эксплуатационные свойства и долговечность битумно-полимерных композитов / В. П. Ярцев, А. В. Ерофеев. – Тамбов : ФГПО ТГТУ, 2014. – 80 с. – Текст : непосредственный.
4. Органические вяжущие для дорожного строительства : учебное пособие для вузов / С. К. Илиополов, И. В. Мардиросова, Е. В. Углова, О. К. Безродный. – Ростов-на-Дону : Министерство образования и науки России, 2003. – 428 с. – Текст : непосредственный.
5. Золотарев, В. А. Долговечность асфальтобетона при совместном действии нагрузок и агрессивных сред / В. А. Золотарев. – Текст : непосредственный // Дорожная техника. – 2011. – № 11. – С. 30–39.
6. Теоретико-экспериментальные принципы получения дорожных бетонов на органических вяжущих повышенной долговечности с комплексно-модифицированной микроструктурой / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012. – Вип. 1(93) Сучасні будівельні матеріали. – С. 25–40.
7. Асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 3(66). – С. 35–41.
8. Теоретико-экспериментальные принципы получения модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности : монография / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, Е. А. Ромасюк. – Донецк : Издательство ООО «НПП "Фолиант"», 2020. – 244 с. – Текст : непосредственный.

Получена 21.12.2020

В. И. БРАТЧУН, В. Л. БЕСПАЛОВ, О. М. НАРИЖНА, В. П. ДЕМЕШКИН,  
Э. Л. РАДЮКОВА  
ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХНІ МІНЕРАЛЬНОГО ПОРОШКУ  
БЕТОНІВ НА ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ РОЗЧИНАМИ ОЛІГОМЕРІВ ТА  
ПОЛІМЕРІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Сорбція компонентів органічних в'язучих на поверхні мінерального порошку утруднена внаслідок його гідрофільності і наявності в глибоких борозенках і капілярах бульбашок повітря, які перешкоджають щільному контакту між органічним в'язучим і поверхнею мінерального порошку і які є потенційними осередками руйнування. Показано, що модифікація поверхні мінерального порошку розчинами олігомерів, полімерів, що містять функціональні групи СО, СООН, NH<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, наприклад епоксидними або карбамідоформальдегідними смолами, полімеромісткими відходами виробництва епоксидних смол, дозволить ефективно регулювати адгезійно-когезійні властивості дьогте-, бітумнополімерного в'язучого. Структурно-зміцнений шар олігомеру або полімеру підвищить адгезію

дьютеполимерного або бітумополімерного в'язучого до поверхні активованого мінерального порошку внаслідок збільшення контактів сегментів пластифікованих надмолекулярних утворень полімеру (полівінілхлориду, полістиролу, полімеромістких відходів виробництва епоксидних смол тощо) з активними центрами олеофільної поверхні, дифузії макромолекул полімеру в шар олігомеру, полімеру і утворень структур, подібних катеновим.

**Ключові слова:** дьюте-, бітумополімерні в'язучі, поверхнево-активований олігомером або полімером, що містить функціональні групи, мінеральний порошок, дьюте-, асфальтополімербетон підвищеної довговічності.

VALERY BRATCHUN, VITALY BESPALOV, OLGA NARYGNAYA,  
VALENTIN DEMESCHKIN, ELINA RADYUKOVA  
ABOUT THE APPROPRIATENESS OF THE ACTIVATION OF THE SURFACE OF  
A MINERAL CONCRETE POWDER ON ORGANIC BINDERS WITH  
OLIGOMERS AND POLYMERS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Sorption of organic binders components on the surface of the mineral powder is difficult due to its hydrophilicity and the presence of air bubbles in deep grooves and capillaries, which prevent tight contact between the organic binder and the surface of the mineral powder and are potential foci of destruction. It is shown that the modification of the surface of a mineral powder with solutions of oligomers, polymers containing functional groups CO, COOH, NH<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, for example, epoxy or urea-formaldehyde resins, polymer-containing wastes from the production of epoxy resins, will effectively regulate the adhesive-cohesive properties of tar and bitumen-polymer binder. A structurally hardened layer of an oligomer or polymer to increase the adhesion of a tar or bitumen-polymer binder to the surface of an activated mineral powder due to an increase in the contacts of segments of plasticized supramolecular formations of the polymer (polyvinyl chloride, polystyrene, polymer-containing wastes from the production of epoxy resins, etc.) with active centers of olives, diffuse centers, olives layer of oligomer, polymer and catenan-like structures.

**Key words:** tar-, bitumen-polymer binders, surface-activated with oligomer or polymer containing functional groups, mineral powder, tar-, asphalt-polymer concrete of increased durability.

**Братчун Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химическая механика формирования оптимальной структуры комплексно-модифицированных дорожных асфальтобетонов.

**Беспалов Виталий Леонидович** – доктор технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Нарижная Ольга Николаевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химические и аналитические исследования синтетических смол и полимерных материалов.

**Демешкин Валентин Павлович** – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Радюкова Элина Львовна** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Братчун Валерій Іванович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічна механіка формування оптимальної структури комплексно-модифікованих дорожніх асфальтобетонів.

**Беспалов Віталій Леонідович** – доктор технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, які використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Нарижна Ольга Миколаївна** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічні й аналітичні дослідження синтетичних смол і полімерних матеріалів.

**Демешкін Валентин Павлович** – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини у компоненти композиційних матеріалів.

**Радюкова Еліна Львівна** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Bratchun Valery** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physicochemical mechanics of the formation of the optimal structure of complex-modified road asphalt concrete.

**Bespalov Vitaly** – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: Synthesis of organic astringent for a production road-build materials of compositions, used for building of structural layers of non-rigid travelling clothes of highways of the promoted longevity.

**Narygnaya Olga** – Ph. D. (Chemical), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physical and chemical and analytical researches of synthetic resins and polymeric materials.

**Demeschkin Valentin** – senior teacher, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies of processing of technogenic raw material in the components of materials of compositions.

**Radyukova Elina** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies for processing technogenic raw materials into components of composite materials.

УДК 625.859.3

**В. И. БРАТЧУН, В. В. ЖЕВАНОВ, Е. А. РОМАСЮК, Д. О. БАЛЕВ, Б. А. ЕГОРКИН, Д. Ю. КОЛПАКОВ,  
А. С. ПУСТОВОЙ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ВЛАЖНОГО АСФАЛЬТОПОЛИМЕР-  
ШЛАКОБЕТОНА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩЕГОСЯ ОПТИМАЛЬНЫМ  
СОЧЕТАНИЕМ КОАГУЛЯЦИОННО-КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ  
КОНТАКТОВ**

**Аннотация.** С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация компонентов влажной асфальтополимершлакобетонной смеси. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов в смеси в массовых частях: отсева дробления отвального маргеновского шлака – 100 %, извести негашеной молотой – 2 %, разжиженного битума, модифицированного латексом марки Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 %, воды затворения – 14 %. Установлено, что удельное количество конденсационно-кристаллизационных контактов во влажном асфальтополимершлакобетоне составляет 0,44. Диапазон температур уплотнения, который для влажных асфальтополимершлакобетонных смесей составляет 30...90 °С соответствует наиболее компактному размещению частиц минерального остова. Разработанный состав влажного асфальтополимершлакобетона характеризуется достаточно высокими деформационно-прочностными и коррозионными свойствами наравне с традиционными горячими мелкозернистыми бетонами. Это указывает на целесообразность их применения для текущего ремонта покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** асфальтополимершлакобетон, оптимизация, свойства, кристаллизационные контакты.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Процесс производства асфальтобетонных смесей энергоемок и сопровождается значительными выбросами вредных веществ. Одним из перспективных способов снижения энергоемкости производства асфальтобетонных смесей является производство и применение влажных органоминеральных смесей (ВОМС) [1–4].

В то же время, принимая во внимание низкие эксплуатационные свойства влажных асфальтобетонных смесей, необходимо решить вопрос интенсификации структурообразования влажного асфальтобетона введением в него добавок или компонентов, обладающих гидравлической активностью. Например, можно применить в качестве минеральных материалов, как это выполнено для влажных дегтебетонных смесей, отсев дробления отвального маргеновского шлака и получить таким образом бетон с коагуляционно-кристаллизационными контактами [5]; а в качестве органического вяжущего использовать жидкие битумы, модифицированные латексом BUTONAL NS 198 [6, 7]. В то же время состав влажных асфальтополимершлакобетонных смесей является не оптимизированным.

**Целью исследования** является оптимизация состава влажного асфальтополимершлакобетона, представленного отсевом дробления отвального маргеновского шлака, разжиженного битумополимерного вяжущего, извести негашеной молотой, воды затворения.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В качестве вяжущего материала принят нефтяной дорожный битум марки СГ 70/130 со следующими характеристиками: условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С – 97 с; количество выпаренного разжижителя – 10,1 %; температура размягчения остатка после определения

© В. И. Братчун, В. В. Жеванов, Е. А. Ромасюк, Д. О. Балеv, Б. А. Егоркин, Д. Ю. Колпаков,  
А. С. Пустовой, 2021



количества выпаренного разжижителя – 41 °С. Разжиженный битум СГ 70/130 получен из битума БНД 60/90 Павлодарского НПЗ (100 %) и технического керосина (8...10 %).

В качестве полимерных модификаторов органического вяжущего были использованы:

1. Стирол-бутадиеновая высококонцентрированная водная дисперсия (латекс) марки Butonal NS 198. Содержание твердых веществ – 63...65 %; pH – 5,0...6,5 %; вязкость – 250...2 000 мПа·с.

2. Блок-сополимер на основе стирола и полибутадиена марки Kraton D 1101: диаметр гранул (0,1...1,0)·10<sup>-3</sup> м; содержание стирола – 31 % мас.; плотность – 0,94 г/см<sup>3</sup>; модуль упругости – 2,9 МПа; удлинение при разрыве – 880 %.

Полимерные модификаторы совмещали с вязким битумом марки БНД 60/90 согласно принятым методикам приготовления битумополимерного вяжущего. Для получения разжиженного модифицированного битума марки СГ 70/130 в полученные полимермодифицированные вяжущие вводился разжижитель (керосин 8...10 %).

В качестве минеральных материалов приняты следующие шлаки:

1. Отсев дробления отвального мартеновского шлака Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ). Химический состав (усредненные значения): CaO – 24...38 %, SiO<sub>2</sub> – 18...34 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3...5 %, MgO – 6...12, MnO – 6...10 %, FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11...13 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,98 %. Химический состав шлаков ЕМЗ отличается непостоянством, так как зависит от выплавляемых марок стали и содержит до 30 химических элементов, среди которых сумма основных четырех оксидов (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) составляет до 98 %. Истинная плотность – 3 225 кг/м<sup>3</sup>; насыпная плотность 1 675 кг/м<sup>3</sup>; марка по дробимости в стальном цилиндре – «1200»; морозостойкость – более 200 циклов; активность 1 МПа; модуль основности 1,9.

2. Доменный гранулированный шлак Донецкого металлургического завода (ДМЗ). Химический состав: CaO – 46 %, SiO<sub>2</sub> – 38, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6 %, MgO – 6 %, FeO – 2 % и др.

Зерновой состав минеральной части исследуемых влажных асфальтошлакобетонов приведен в таблице 1.

**Таблица 1** – Зерновой состав минеральной части исследуемых влажных асфальтошлакобетонов

Тип асфальтобетона	Содержание по массе, % минеральных зерен, которые меньше данного размера, мм									Оптимальное содержание орг. вяжущего
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Холодный асфальтошлакобетон (отсев дробления отвального мартеновского шлака), содержание воды в смеси – 14 %	100	93,0	82,7	70,4	57,1	46,8	35,1	20,8	2,8	7...8 %
Холодный асфальтошлакобетон (доменный гранулированный шлак), содержание воды в смеси – 14 %	100	99,5	98,3	92,3	64,8	45,3	24,3	9,3	4,3	6,5...7,0 %

Процесс приготовления асфальтошлакобетонной смеси включает следующие операции: подогрев шлака до температуры 80 °С, смешение с жидким битумом (битумополимерным вяжущим), подогретым до температуры 80...90 °С, добавление 12...14 % мас. воды и перемешивание смеси. Уплотнение асфальтошлакобетонной смеси выполнено при давлении 30 МПа.

Для сопоставительного анализа свойств влажных асфальтополимершлакобетонов с традиционными горячими асфальтобетонами, отвечающими ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия», принят асфальтобетон мелкозернистый типа «Б».

Для приготовления щебня и искусственного песка использован гранит Каранского месторождения со следующими свойствами: дробимость в водонасыщенном состоянии – 6,2 %; марка гранита – 1 200; износ в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность – 1 410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2 70 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость более 200 циклов; содержание зерен лещадной и игловатой формы – 6 %.

Минеральный порошок использовался известняковый. Содержание  $\text{CaCO}_3$  – 96 %; удельная поверхность  $S_{1,2} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; средняя плотность –  $2715 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа –  $1880 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; пустотность – 31,8 %; битумоемкость – 60,5 %.

При исследовании, кроме стандартных, использован ряд специальных приборов и методов исследования: прибор ХАДИ для изучения уплотняемости асфальтобетонных смесей, прибор Маршалла для определения устойчивости и жесткости асфальтобетона при  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , установка для определения усталостной долговечности, устройство для испытания асфальтобетонных балочек на растяжение при изгибе. Для обработки и анализа результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установлены режимы производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей, а именно: порядок введения в асфальтосмеситель компонентов асфальтополимершлакобетонных смесей следующий: предварительное сухое перемешивание отсева дробления отвального мартеновского шлака и извести негашеной молотой при температуре  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 15 с; введение на минеральные материалы разжиженного битумополимерного вяжущего и перемешивание органоминеральной смеси 30–45 с; введение воды затворения и перемешивание 30–45 с. При таком порядке ведения процесса производства влажных асфальтополимершлакобетонных смесей под действием нескомпенсированных молекулярных и ионных сил на поверхности частиц шлака формируются адсорбционно-сольватные слои органического вяжущего, которые переходят в структурированное состояние, что положительно сказывается на прочности межфазного контакта.

Оптимальная продолжительность приготовления влажных асфальтошлакобетонных смесей в смесителях принудительного действия должна находиться до полутора – двух минут. За этот промежуток времени происходит полное покрытие олеофильных центров поверхности шлаковых частиц органическим вяжущим, а гидрофильных – прослойками воды. К тому же, за это время происходит равномерное распределение компонентов в единице объема смеси и, как следствие, достигается минимальная межзерновая пустотность минерального остова асфальтошлакобетона (коэффициент вариации содержания ключевого компонента, фракции  $d = 2,5 \dots 1,25 \text{ мм}$  составляет  $K_v = 4,4 \%$ ).

Оптимальное содержание жидкого битума в асфальтошлакобетоне равно 7...8 % сверх 100 % массы шлака.

Для улучшения показателей механических свойств, водонасыщения, набухания и др. влажного асфальтошлакобетона использован щелочной активатор вяжущих веществ отсева дробления отвального мартеновского шлака.

В исследовании в качестве активатора вяжущих свойств принята известь негашеная молотая, так как она значительно быстрее гидратируется, чем портландцемент (таблица 2) и характеризуется большей водоудерживающей способностью, что обеспечивает благоприятные условия гидратации шлака.

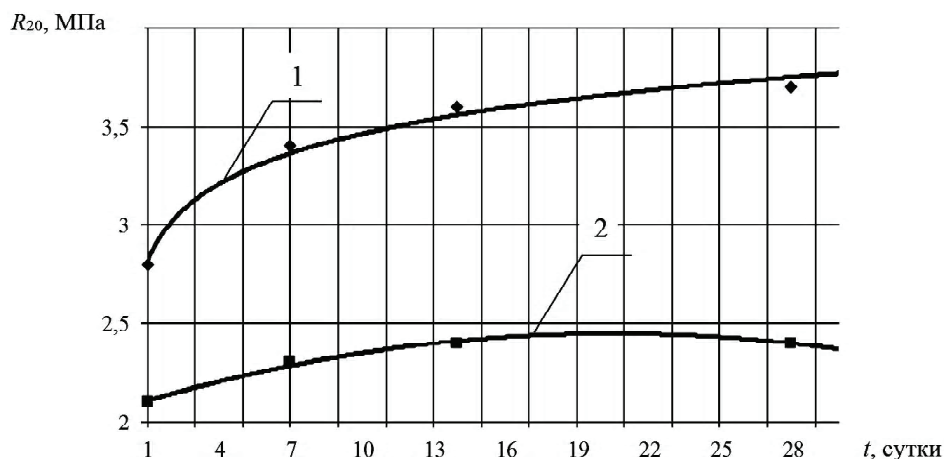
**Таблица 2** – Физико-механические свойства шлакобетона с использованием отсева дробления отвального мартеновского шлака в возрасте 28 суток

№ п/п	Состав бетона в массовых частях компонентов	Средняя плотность, $\rho_0$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Предел прочности при сжатии, МПа, при		
			$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	$50 \text{ }^\circ\text{C}$
1	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %	2 280	0,8	0,7	0,7
2	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %, портландцемент М 500 – 3 %	2 285	2,0	1,9	1,9
3	Отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 20 %, известь негашеная молотая – 3 %	2 290	2,2	2,1	2,1

Характерно, что прочность образцов влажных асфальтошлакобетонов с течением времени растет. Водный раствор гидроксида кальция создает во влажном асфальтошлаковом бетоне щелочную среду с  $\text{pH} = 11 \dots 12$ , обеспечивающим диспергирование шлака в результате разрыва ковалентных

связей Si – O – Si и Al – O – Si. При достижении степени перенасыщения водного раствора катионами Ca<sup>2+</sup> происходит их взаимодействие с кремне- и алюмосиликатами с образованием целого ряда гидроалюмосиликатов кальция. К тому же предполагается, что упрочнение полученных систем происходит за счет хемосорбционных связей, которые могут возникнуть при взаимодействии основных гидратированных веществ шлака с кислыми соединениями жидкого нефтяного битума прежде всего с асфальтогеновыми кислотами.

На рис. 1 приведены значения предела прочности при сжатии холодных асфальтошлакобетонов в зависимости от времени структурообразования (температура структурообразования бетона 20 °С) и вида металлургического шлака.



**Рисунок 1** – Предел прочности при сжатии при 20 °С ( $R_{20}$ ) образцов влажного асфальтошлакобетона в зависимости от времени структурообразования ( $t$ , сутки): 1 – на отсеве дробления отвального мартеновского шлака (ЕМЗ); 2 – на доменном гранулированном шлаке (ДМЗ).

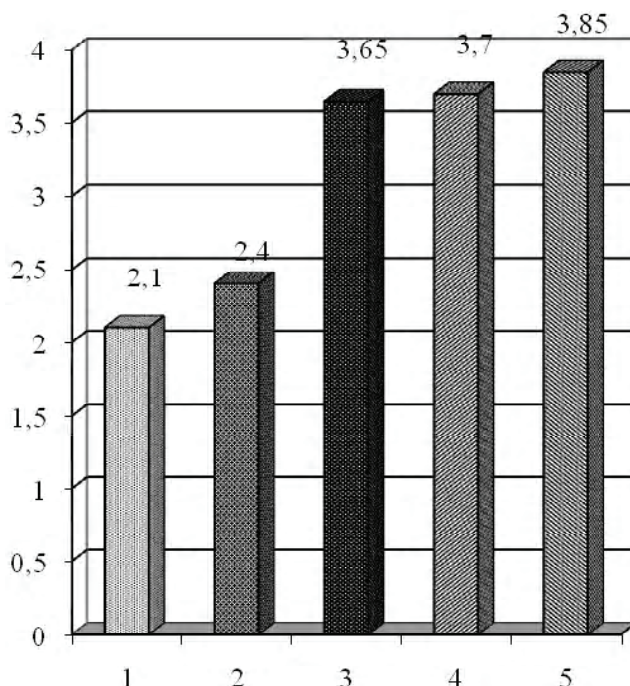
Образцы влажного асфальтошлакобетона на отсеве дробления отвального мартеновского шлака характеризуются более высокой прочностью, по сравнению с бетонами на доменном гранулированном шлаке. В данном случае играет важную роль начальный период структурообразования асфальтошлакобетона, связанного с формированием коагуляционной структуры. Доменный шлак имеет гранулы с достаточно развитой поровой структурой, при этом большинство пор замкнуто внутри гранулы. Поэтому в процессе смешивания органического вяжущего и доменного гранулированного шлака жидкий битум не полностью заполняет микропоровое пространство гранул. Также значительное количество воды затворения из-за непродолжительного времени смешивания смеси не может диффундировать в замкнутые поры зерен гранулированного шлака. Следовательно, поры в гранулах доменного шлака остаются замкнутыми и являются концентраторами критических напряжений при приложении нагрузки к образцу.

Таким образом, для значительного улучшения деформационно-прочностных характеристик влажных асфальтошлакобетонов необходимо достичь в смеси оптимального сочетания коагуляционных контактов между частицами шлака через адсорбционно-сольватные структурированные прослойки органического вяжущего и кристаллизационно-конденсационных контактов при прямом срастании кристаллов гидратированных минералов шлака.

Введение полимерных модификаторов Butonal NS 198 и Kraton D 1101 в жидкие битумы позволило повысить предел прочности при сжатии влажных асфальтошлакобетонов.

Взаимодействие жидкого битума, воды и отсева дробления отвального мартеновского шлака приводит к более высоким значениям предела прочности по сравнению с холодными асфальтобетонами, в которых минеральная часть представлена гранитным щебнем и известняковым минеральным порошком (рис. 2).

Характерно, что предел прочности при сжатии влажных асфальтошлакобетонов в среднем в 1,6 раза выше, чем традиционного холодного асфальтобетона типа Гх на гранитном щебне и в 1,5 раза выше, чем армированного фиброволокном холодного асфальтобетона типа Гх.



**Рисунок 2** – Сравнительная диаграмма значений пределов прочности при сжатии при 20 °С различных образцов асфальтобетонов в возрасте 28 суток: 1 – холодный асфальтобетон тип Гх; 2 – дисперсно-армированный холодный асфальтобетон тип Гх (содержание полипропиленового фиброволокна – 0,7 % мас.); 3 – влажный холодный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеповского шлака; 4 – влажный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеповского шлака, модифицированном 2,0 % мас. латексом Butonal NS 198; 5 – влажный асфальтошлакобетон на отсеве дробления отвального мартеповского шлака, модифицированном 2,0 % мас. термоэластопластом Kraton D 1101.

Таким образом, предел прочности асфальтошлакобетонов растет с увеличением времени структурообразования, что связано с постепенным развитием процессов гидратации минеральных зерен шлака. В среднем, после 14 суток структурообразования рост предела прочности при сжатии замедляется.

При определении оптимальной концентрации негашеной извести и разжиженного битумополимерного вяжущего в составе влажного асфальтополимершлакобетона выполнено экспериментально-статистическое моделирование.

Факторы варьирования, которые действуют на систему «битумополимерное вяжущее – отсев дробления отвального мартеповского шлака (100 % мас.) – вода затворения (14 % мас.) – негашеная известь»:  $X_1$  – массовая концентрация негашеной молотой извести;  $X_2$  – концентрация разжиженного битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.). Параметры оптимизации: предел прочности при сжатии образцов асфальтополимершлакобетона при 20 °С ( $Y_1$ ), R20, не менее 3,4 МПа; средняя плотность ( $Y_2$ ),  $\rho_{cp}$ , не менее 2,28 г/см<sup>3</sup>, коэффициент длительной водостойкости ( $Y_3$ ), Квд, не менее 0,85.

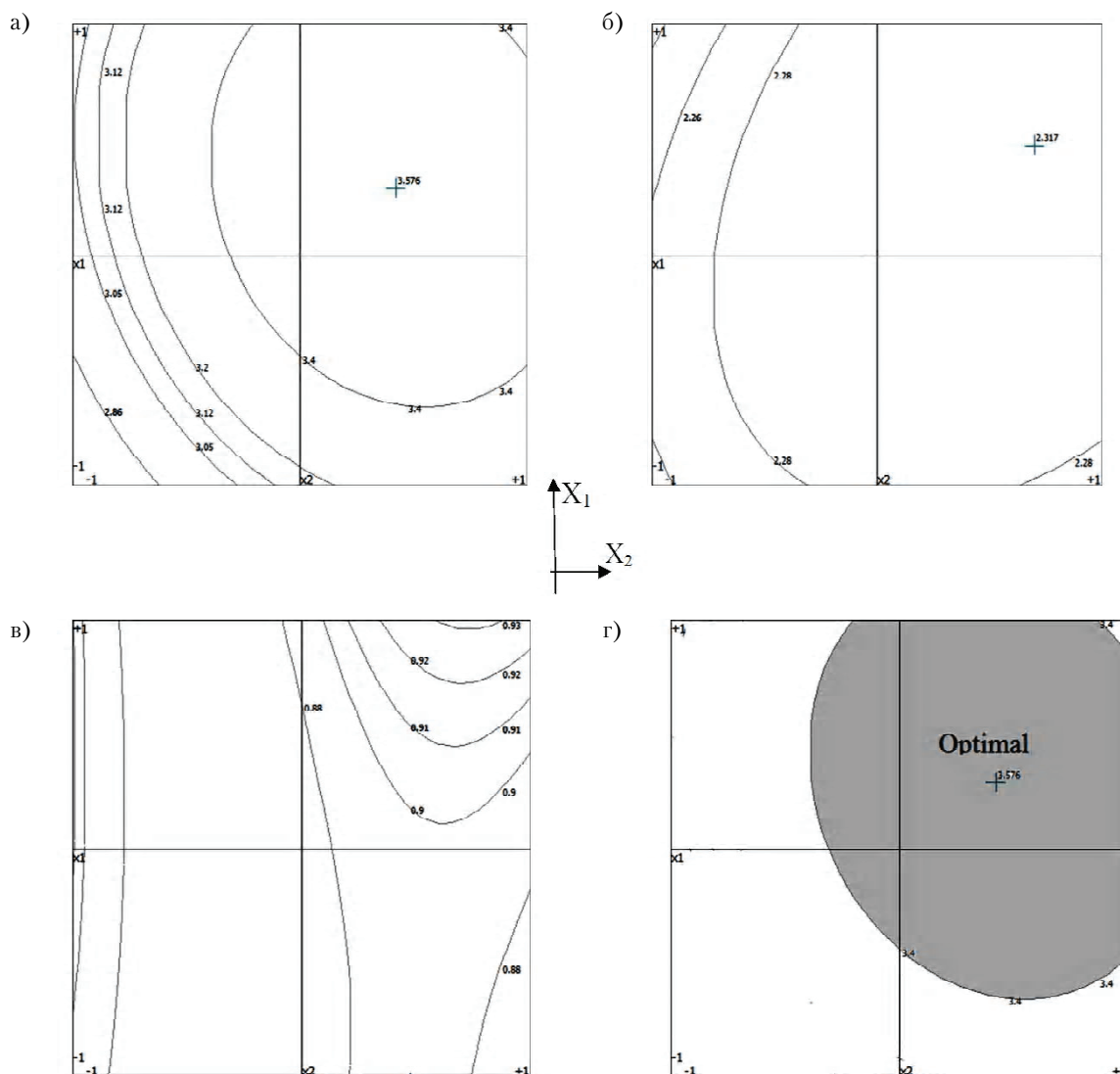
При помощи программы обработки данных двухфакторного, трехуровневого планированного эксперимента типа BD13 «PlanExp B-D13 v.1.0» for Windows выполнен расчет математических моделей в виде полинома второй степени:

$$Y_1(X_1, X_2) = 3,502 + 0,146x_1 + 0,248x_2 - 0,201x_1^2 - 0,269x_2^2 - 0,069x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_2(X_1, X_2) = 2,308 + 0,006x_1 + 0,023x_2 - 0,018x_1^2 - 0,022x_2^2 + 0,016x_1x_2, \quad (2)$$

$$Y_3(X_1, X_2) = 0,869 + 0,011x_1 + 0,094x_2 + 0,01x_1^2 - 0,078x_2^2 + 0,02x_1x_2. \quad (3)$$

Установлено, что оптимальная массовая концентрация негашеной молотой извести во влажном асфальтополимершлакобетоне составляет 2,0...2,5 %. Оптимальное содержание битумополимерного вяжущего, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.), равно 8,0...8,5 % (рис. 3).



По оси  $X_1$ : массовая концентрация негашеной молотой извести. По оси  $X_2$ : массовая концентрация разжиженного битума, модифицированного латексом Butonal NS 198 (2 % мас.)

**Рисунок 3** – Графики функций: а) предела прочности при сжатии при 20 °С ( $Y_1$ ); б) средней плотности ( $Y_2$ ); в) коэффициента длительной водостойкости ( $Y_3$ ); г) область оптимальных значений.

Условие получения структуры влажного асфальтополимершлакобетона, характеризующейся двумя взаимопроникающими микроструктурами – коагуляционной и конденсационно-кристаллизационной, выполняется при удельном числе упругих связей в подобных системах  $n_y = 0,4...0,6$ , количество которых определяли по формуле В. А. Веренько:

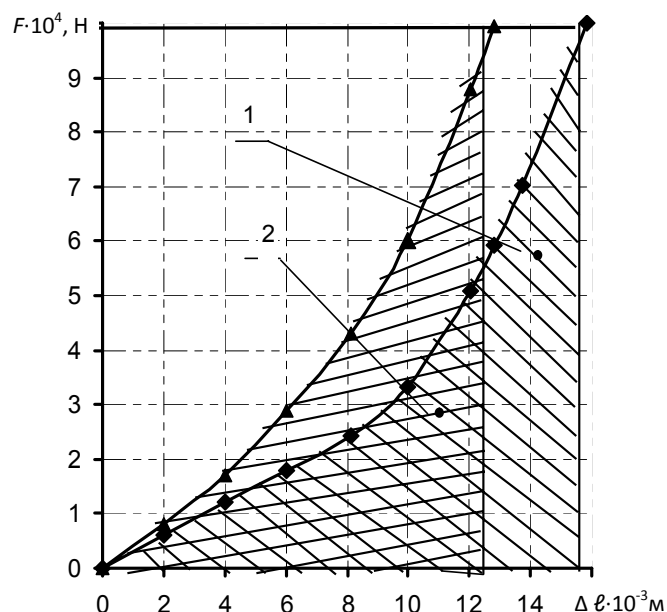
$$n_y = (c \cdot R_1 - R_2) / (c - 1) \cdot R_c, \quad (4)$$

где  $R_1$  – предел прочности влажного асфальтополимершлакобетона при скорости деформирования  $V_1 = 3$  мм/мин;  
 $R_2$  – предел прочности влажного асфальтополимершлакобетона при скорости деформирования  $V_2 = 15$  мм/мин;  
 $R_c$  – предельная структурная прочность, соответствующая максимуму на зависимости от температуры или скорости деформирования.

Экспериментально определены  $R_1$  и  $R_2$  влажного асфальтополимершлакобетона в зависимости от скорости деформирования и температуры испытания асфальтополимершлакобетона. При оптимальном содержании вяжущего 8 % по массе сверх 100 % отсева дробления отвального мартеновского

шлака определено максимальное значение предела прочности при сжатии асфальтополимершлакобетона, который достигается при минус 30 °С (7,8 МПа), тогда  $n_y = (5,3,8 - 5,2)/4,7,8 = 0,44$ .

Таким образом, влажный асфальтополимершлакобетон оптимизированного состава характеризуется количеством кристаллизационных контактов 44 %.



**Рисунок 4** – Диаграмма уплотнения асфальтобетонных смесей: 1 – холодная асфальтобетонная смесь типа Гх на битуме СГ 70/130; 2 – влажная асфальтополимершлакобетонная смесь оптимальной структуры (температура построения зависимости  $F = f(\Delta\ell)$ ,  $T = 70$  °С).

свидетельствует о более высокой уплотняемости асфальтополимершлакобетонных смесей в сравнении с традиционной холодной смесью.

Завершающей стадией структурообразования асфальтополимершлакобетонной смеси оптимальной структуры с использованием катионного латекса Butonal NS 198 на этапе технологической переработки является укладка и уплотнение её в конструктивные слои дорожной одежды.

Диапазон температур уплотнения, который для влажных асфальтополимершлакобетонных смесей составляет 30...90 °С соответствует наиболее компактному размещению частиц минерального остова. Таким образом, подготовленная для укладки асфальтополимершлакобетонная смесь должна иметь температуру не менее 40 °С. Процесс уплотнения асфальтополимершлакобетонных смесей менее энергоёмкий, чем традиционных холодных асфальтобетонных смесей типа Гх (ДСТУ Б.В.2.7-119:2011) (рис. 4).

Так, средний расход энергии на приращение единицы плотности асфальтополимершлакобетонной смеси составляет 512 Дж, а при уплотнении холодной асфальтобетонной смеси типа Гх – 648 Дж (таблица 3). Коэффициент уплотнения, характеризующий удельную работу на уплотнение, также

**Таблица 3** – Технологические свойства холодных асфальтобетонных смесей

№ п/п	Состав асфальтобетонной смеси	Работа, затраченная на уплотнение, А, Дж	Коэффициент уплотнения, $K_y, \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$	Приращение средней плотности бетона, $\Delta\rho_0^a, \text{кг/м}^3$
1.	Холодная мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип Гх), приготовленная на битуме СГ 70/130; щебень и отсев щебня гранитные, минеральный порошок известняковый ( $T = 80$ °С)	648	1,26	508
2.	Влажная асфальтополимершлакобетонная смесь на битуме СГ 70/130, модифицированном 2 % мас. Butonal NS 198; с 2 % мас. негашеной извести ( $T = 70$ °С)	512	1,03	485

Применение влажной асфальтополимершлакобетонной смеси приводит к повышению плотности и длительной водостойкости модифицированной системы по сравнению с традиционным холодным асфальтобетоном типа Гх (таблица 4).

Методом Маршалла определена устойчивость, условная жесткость и пластичность бетонов на нефтяном дорожном битуме и жидких битумополимерных композициях (таблица 5). Асфальтополимершлакобетон, приготовленный на жидком битумополимерном вяжущем, характеризуется

Таблица 4 – Механические свойства асфальтобетонов

Показатели	Состав холодных асфальтобетонов	
	Битум СГ 70/130, щебень и отсев щебня гранитные (гранулометрический тип Гх), МП известняковый	Битум СГ 70/130, модифицированный 2,0 % Butonal NS 198 мас., отсев дробления отвального мартеновского шлака – 100 %, вода – 14 %, негашеная молотая известь – 2 %
Средняя плотность, $\rho_0^a$ , кг/м <sup>3</sup>	2 238	2 320
Набухание, Н, % от объема	1,9	1,5
Водонасыщение, W, %, от объема	6,64	4,92
Предел прочности при сжатии, МПа, при:		
0 °С	5,8	5,9
20 °С	2,40	3,70
50 °С	1,30	1,86
Предел прочности при изгибе, МПа, при 0 °С	1,96	2,10
Коэффициент длительной водостойкости, $K_{вд}$	0,73	0,88

Таблица 5 – Значение показателей, характеризующих сдвигоустойчивость бетонов по методу Маршалла (температура испытания 60 °С)

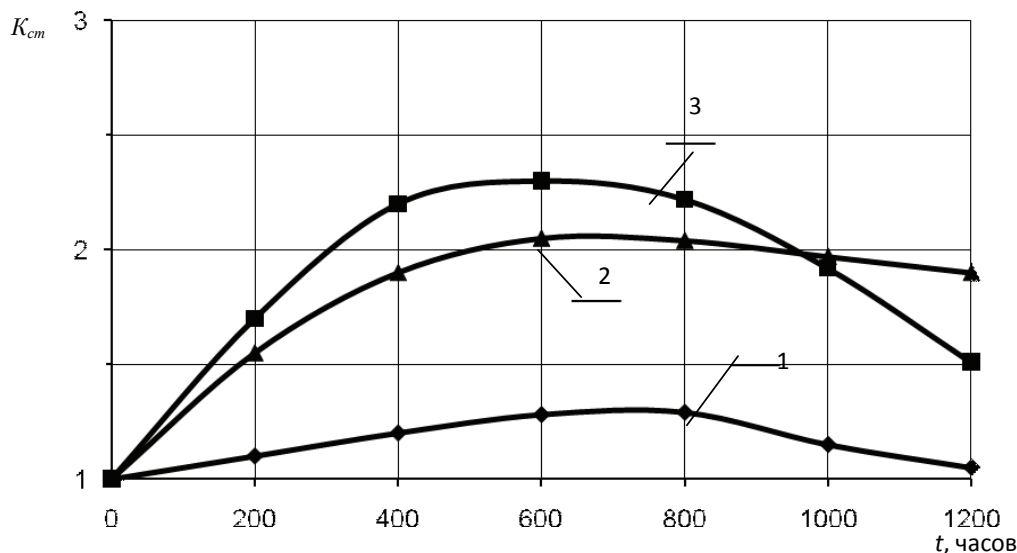
№ п/п	Тип асфальтобетона	Условная пластичность, 1/10, мм	Устойчивость, Р, кН	Условная жесткость, А, Н/мм
1.	Горячий мелкозернистый асфальтобетон тип «Б» на битуме БНД 60/90; минеральный порошок известняковый	46	15,3	3 316
2.	Холодный мелкозернистый асфальтобетон тип «Гх» на битуме СГ 90/130; минеральный порошок известняковый	68	9,0	1 330
3.	Влажный асфальтополимершлакобетон на битуме СГ 90/130, модифицированный 2 % мас. Butonal NS 198; 14 % воды; 2 % мас. негашеной молотой извести	52	13,1	2 510

более высокими значениями устойчивости и низкой пластичности по сравнению с традиционным холодным асфальтобетоном типа «Гх», приготовленном на битуме СГ 70/130. Это должно обеспечить удовлетворительную сдвигоустойчивость и долговременную прочность асфальтополимершлакобетонных покрытий автомобильных дорог в области высоких положительных эксплуатационных температур.

Одной из основных причин потери эксплуатационных свойств дорожных бетонов во времени и снижения их долговечности, приводящих к изменению их структуры, это воздействие атмосферных, транспортных и грунтогеологических факторов. Под влиянием этих факторов происходят необратимые физико-химические превращения в асфальтошлакобетоне, которые приводят к потере его деформативной и демпфирующей способности, а также коррозионной стойкости.

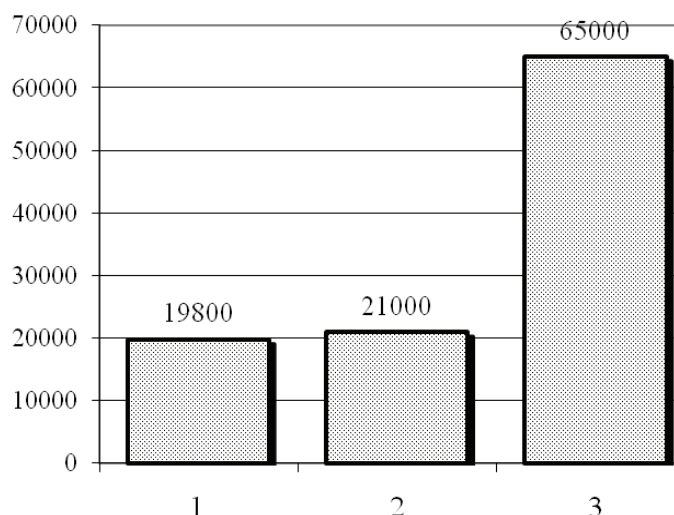
Данные, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что по сравнению с традиционным асфальтобетоном типа «Б» (кривая 2 на зависимости  $K_{cm} = f(t)$ ) асфальтошлакобетоны также являются стабильными конгломератами в условиях постоянного действия высокой температуры (температура прогрева 60 °С). Процесс интенсивного старения, наблюдаемый для асфальтошлакобетона, закономерен и объясняется тем, что в его составе находится маловязкое битумное вяжущее, содержащее в свободном состоянии большое количество легколетучих и легкоиспаряемых фракций с низкой температурой кипения и большим количеством ненасыщенных ароматических соединений. Вследствие интенсивно протекающих процессов испарения и полиоксиконденсации веществ органического вяжущего растет его структурная плотность, что обуславливает рост когезионной прочности органического вяжущего, находящегося в межзерновом пространстве бетона. Это ведет к резкому росту

прочности асфальтошлакополимербетона, особенно в первые 400 часов прогрева при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5, кривая 3). После 1 000 часов прогрева, что соответствует 5 годам эксплуатации асфальтошлакобетона в покрытии автомобильной дороги, его прочность стабилизируется. Это свидетельствует о том, что процессы капиллярной фильтрации компонентов с малой молекулярной массой в микропоры шлаковых частиц, испарения и полиоксиконденсации ароматических углеводородов закончились.



**Рисунок 5** – Зависимость коэффициента теплового старения  $K_{cm}$  ( $K_{cm} = R_{20(t)}/R_{20(0)}$ ) асфальтошлакобетона от времени прогрева  $t$  при  $60\text{ }^\circ\text{C}$ : 1 – отсев дробления отвального мартового шлака – 100 %, вода затворения – 12 %; 2 – отсев дробления отвального мартового шлака – 100 %, вода затворения – 14 %, модифицированный битум Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 %; 3 – отсев дробления отвального мартового шлака – 100 %, вода затворения – 14 %, модифицированный битум Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 %, негашеная молотая известь – 2 %.

Важнейшим свойством асфальтобетона, предопределяющим долговечность покрытий автомобильных дорог, является устойчивость к воздействию кратковременных циклических (ударных) и длительных статических нагрузок от автотранспорта.



**Рисунок 6** – Зависимость усталостной долговечности асфальтобетонных образцов (нагрузка: 0,4 МПа, частота воздействия: 0,1 Гц, температура:  $10\text{ }^\circ\text{C}$ ): 1 – влажный асфальтополимершлакобетон оптимальной структуры на модифицированном битуме СГ 70/130; 2 – холодный асфальтобетон на битуме СГ 70/130 тип «Гх»; 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»).

Испытания асфальтополимершлакобетона, холодного асфальтобетона типа «Гх» и горячего мелкозернистого асфальтобетона типа «Б» (ГОСТ 9128-2013) показали, что количество циклов до разрушения асфальтополимершлакобетона оптимальной структуры при заданных напряжениях несколько ниже, чем у холодного асфальтобетона типа «Гх» и горячего асфальтобетона типа «Б», и характеризуется, вероятно, большей интенсивностью разрушения в связи с более высоким количеством пор и пустот внутри материала, появившихся в процессе гидратации мартового шлака, а также более низким содержанием органического вяжущего (рис. 6).

Таким образом, результаты исследований показали, что разработанный состав влажного асфальтополимершлакобетона характеризуется достаточно высокими деформационно-прочностными и



коррозионными свойствами наравне с традиционными горячими мелкозернистыми бетонами. Это указывает на целесообразность их применения для текущего ремонта покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение влажной органоминеральной смеси для устройства конструктивных слоев дорожной одежды при строительстве автодорожного подхода к Керченскому мосту со стороны Тамани / М. В. Катасонов, А. И. Лескин, А. В. Кочетков [и др.]. – Текст : электронный // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2018. – № 3. – Том 5. – С. 1–10. URL : <https://t-s.today/PDF/03SATS318.pdf> (дата обращения: 20.12.2020).
2. Горельшева, Л. А. Органоминеральные смеси в дорожном строительстве / Л. А. Горельшева. – Текст : непосредственный // Автомобильные дороги: обзорная информация. – 2000. – Вып 3. – С. 114.
3. Velkamp, L. J. T. Hochwertige dunne Deckschichten aus Splittmastixasphalt 0/6 und 0/3 / L. J. T. Velkamp, H. Ezdlen. – Текст : непосредственный // Asphalt. – 1997. – № 7/8. – Р. 36–39.
4. ГОСТ 30491-2012. Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1979-ст : введен впервые : дата введения 2013-11-01 / разработан ФАУ «ФЦС». – Москва, 2013. – 16 с. – Текст : непосредственный.
5. Асфальтошлакобетоны на анионных битумных эмульсиях / В. И. Братчун, Ю. В. Грицук, В. Л. Беспалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Международный научно-технический журнал «Наука и техника в дорожной отрасли». – 2014. – № 4. – С. 22–25.
6. Беспалов, В. Л. Холодные асфальтошлакобетоны для устройства полужестких покрытий автомобильных дорог / В. Л. Беспалов, В. И. Братчун, В. В. Жеванов. – Текст : электронный // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск, 2017. – № 3(5). – Ч. 2 – С. 100–104. – URL : [https://izdat.dahluiver.ru/images/archive/35-2\\_2017.pdf](https://izdat.dahluiver.ru/images/archive/35-2_2017.pdf). (дата обращения: 20.12.2020).
7. Братчун, В. И. О закономерностях формирования структуры и свойств асфальтошлакобетонов, приготовленных на жидких битумах, модифицированных латексом BUTONAL NS 198 / В. И. Братчун, В. В. Жеванов, Е. А. Ромасюк. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020 – Вып. № 1(141) Современные строительные материалы. – С. 53–59. – URL : [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2020/vestnik\\_2020-1\(141\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2020/vestnik_2020-1(141).pdf). (дата обращения: 25.12.2020).

Получена 22.12.2020

В. І. БРАТЧУН, В. В. ЖЕВАНОВ, Є. О. РОМАСЮК, Д. О. БАЛЄВ, Б. О. ЄГОРКІН,  
Д. Ю. КОЛПАКОВ, О. С. ПУСТОВИЙ  
ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ ВОЛОГОГО АСФАЛЬТОПОЛІМЕРШЛАКОБЕ-  
ТОНУ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ ОПТИМАЛЬНИМ ПОЄДНАННЯМ  
КОАГУЛЯЦІЙНО-КРИСТАЛІЗАЦІЙНИХ КОНТАКТІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** З використанням методу експериментально-статистичного моделювання визначена оптимальна концентрація компонентів вологої асфальтополімершлакобетонної суміші. Встановлено, що оптимальне співвідношення компонентів в суміші в масових частинах: відсіву подрібнення відвального мартенівського шлаку – 100 %, вапна негашеного меленого – 2 %, розрідженого бітуму, модифікованого латексом марки Butonal NS 198 (2 % мас.) – 8 %, води замішування – 14 %. Встановлено, що питома кількість конденсаційно-кристалізаційних контактів у вологому асфальтополімершлакобетоні становить 0,44. Діапазон температур ущільнення, який для вологих асфальтополімершлакобетонних сумішей становить 30...90 °С відповідає найбільш компактному розміщенню частинок мінерального кістяка. Розроблений склад вологого асфальтополімершлакобетону характеризується досить високими деформаційно-міцнісними і корозійними властивостями нарівні з традиційними гарячими дрібнозернистими бетонами. Це вказує на доцільність їх застосування для поточного ремонту покриттів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг.

**Ключові слова:** асфальтополімершлакобетон, оптимізація, властивості, кристалізаційні контакти.

VALERY BRATCHUN, VYACHESLAV ZHEVANOV, EVGENY ROMASYUK, DMITRY BALEV, BOGDAN EGORKIN, DMITRY KOLPAKOV, ALEXANDER PUSTOVOY  
DESIGNING THE COMPOSITION OF WET ASPHALT POLYMER-SLAG  
CONCRETE CHARACTERIZED BY THE OPTIMAL COMBINATION OF  
COAGULATION-CRYSTALLIZATION CONTACTS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Using the method of experimental-statistical modeling, the optimal concentration of the components of the wet asphalt-polymer slag concrete mixture was determined. It was found that the optimal ratio of components in the mixture in mass parts: screening of crushing of dump open-hearth slag – 100 %, burnt lime – 2%, liquefied bitumen modified with Butonal NS 198 latex (2 % wt.) – 8 %, mixing water – 14 %. It was found that wet asphalt slag concrete of optimized composition is characterized by the number of crystallization contacts 0,44. The compaction temperature range, which for wet asphalt-polymer slag concrete mixtures is 30...90 ° C, corresponds to the most compact arrangement of the particles of the mineral skeleton. The developed composition of wet asphalt-polymer slag concrete is characterized by sufficiently high deformation-strength and corrosive properties along with traditional hot fine-grained concrete. This indicates the expediency of their application for the current repair of the coatings of non-rigid road pavements of highways.

**Key words:** asphalt-polymer-slag concrete, structure, properties, patterns of structure formation.

**Братчун Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химическая механика формирования оптимальной структуры комплексно-модифицированных дорожных асфальтобетонов.

**Жеванов Вячеслав Владимирович** – ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд.

**Ромасюк Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Балев Дмитрий Олегович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Егоркин Богдан Александрович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Колпаков Дмитрий Юрьевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Пустовой Александр Сергеевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Братчун Валерій Іванович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічна механіка формування оптимальної структури комплексно-модифікованих дорожніх асфальтобетонів.

**Жеванов В'ячеслав Володимирович** – асистент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів.

**Ромасюк Євген Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і

довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорсткого дорожнього одягу на основі модифікування органічних в'язучих.

**Балєв Дмитро Олегович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Єгоркін Богдан Олександрович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Колпаков Дмитро Юрійович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Пустовий Олександр Сергійович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Bratchun Valery** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physicochemical mechanics of the formation of the optimal structure of complex-modified road asphalt concrete.

**Zhevanov Vyacheslav** – assistant, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: getting-tech and durable road concretes for building structural layers of non-rigid pavements.

**Romasyuk Evgeny** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: receipts of technological and lasting travelling concretes for building of structural layers of non-rigid travelling clothes on the basis of retrofitting of organic astringent.

**Balev Dmitry** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Egorikin Bogdan** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Kolpakov Dmitry** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Pustovoy Alexander** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

УДК 666.974.2

**Т. П. КИЦЕНКО, Д. Г. МАЛИНИН, Е. А. ТИМОШЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ШАМОТНО-КАОЛИНОВОЙ ПЫЛИ**

**Аннотация.** Установлено, что смесь шамотно-каолиновой пыли может быть эффективным заменителем термоактивированного каолина в качестве отвердителя жидкостекольных шамотных вяжущих. Исследования показали, что шамотно-каолиновая пыль при введении в состав алюмосиликатных жидкостекольных вяжущих проявляет структурообразующую способность при нормальных условиях твердения. Сушка образцов вяжущих приводит к значительному повышению прочности при сжатии. Выполнена статистическая обработка результатов эксперимента по оптимизации характеристик жидкого стекла, вводимого в состав огнеупорных алюмосиликатных вяжущих композиций на основе шамотно-каолиновой пыли. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что оптимальными характеристиками жидкого стекла в алюмосиликатных вяжущих являются: силикатный модуль в пределах 1,0...1,5, а плотность от 1,25 до 1,30 г/см<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** силикат натрия, огнеупорные вяжущие, жидкое стекло, плотность, силикатный модуль, шамотно-каолиновая пыль.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Огнеупорный бетон по структуре является аналогом строительных бетонов. Он состоит из заполнителя и вяжущего и отличается от обычного строительного тем, что имеет огнеупорность выше 1 580 °С и сохраняет прочность при эксплуатации. Для этого огнеупорный бетон приготавливают из огнеупорных материалов.

В настоящее время в практике Российской огнеупорной промышленности можно отметить тенденцию роста производства и применения огнеупорных бетонов [1, 2]. Как известно, огнеупорные бетоны отличаются от обычных огнеупоров тем, что в результате применения специальных вяжущих материалов образуется прочная камнеподобная структура при нормальной и повышенной температурах, которая не разрушается и при высоких температурах службы [3].

Одним из широко распространенных видов огнеупорных бетонов являются алюмосиликатные бетоны на основе жидкого стекла. Их доля в общем объеме производства в различных странах колеблется от 40 до 70 % [1]. Однако в реальных изделиях на основе природного или искусственного сырья содержится, обычно, до 5 % примесных оксидов-плавней, которые отрицательно влияют на фазовый состав материалов.

Одним из способов снижения содержания оксидов-плавней в алюмосиликатных композициях является применение отвердителей жидкого стекла, не являющихся плавнями по отношению к алюмосиликатам. В качестве такого отвердителя жидкого стекла в разработках [4, 5] предлагается использовать термоактивированный каолин. Однако вяжущие с использованием ТАК имеют два существенных недостатка:

- 1) требуется предварительный обжиг ТАК при температуре 600...750 °С;
- 2) термоактивированный каолин характеризуется высокой водопотребностью, что увеличивает расход жидкого стекла, стоимость бетона и ввод в него плавня – оксида натрия.

В то же время известно, что при обжиге кускового шамота образуется значительное количество шамотно-каолиновой пыли (ШКП), осаждаемой на электрофильтрах вращающихся печей. Учитывая опыт обжига во вращающихся печах извести, портландцементного клинкера, можно предположить, что процессы дегидратации и минералообразования в пыли-унос не соответствуют конечной

температуре обжига шамота – 1 400...1 500 °С. Некоторая ее часть по морфологии должна быть близка к каолину, термоактивированному при 650...750 °С, т. е. должна проявлять такое же структурообразующее влияние на жидкостекольные композиции [6].

Известно, что свойства огнеупорных алюмосиликатных вяжущих композиций напрямую зависят от характеристик (силикатного модуля и плотности) вводимого в состав жидкого стекла. В связи с этим возникает необходимость оптимизировать характеристики жидкого стекла для дальнейших исследований свойств вяжущих композиций.

**Целью исследований** является установление возможности замены термоактивированного каолина смесью шамотно-каолиновой пыли в составе алюмосиликатных жидкостекольных вяжущих и оптимизация основных характеристик жидкого стекла – силикатного модуля и плотности.

Для производства вяжущих композиций использовались тонкомолотый шамот марки ШКН-2 (ТУУ 322-7-00190503-083-97); шамотно-каолиновая пыль с электрофильтров вращающихся печей Владимировского огнеупорного завода (Донецкая обл.), полученная при обжиге шамота марки ШКВ-1 (ТУУ 322-7-00190503-083-97). Шамот размалывался до тонкости помола, соответствующей проходу через сито 0,08 мм 90...95 %. В качестве щелочного компонента вяжущих принято стекло натриевое жидкое (ГОСТ 13078-81) с силикатным модулем  $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,0$ . Изменение силикатного модуля жидкого стекла осуществляли добавлением соответствующего количества раствора гидроксида натрия (ГОСТ 2263-79\*) с учетом данных [7, 8].

Свойства вяжущих определялись по стандартным методикам. Физико-механические испытания вяжущих выполнялись на образцах  $2 \times 2 \times 2$  см, изготовленных из теста нормальной густоты. Уплотнение образцов осуществлялось на стандартной лабораторной виброплощадке, время вибрации составляло 15–20 сек. Образцы твердели в нормальных условиях. Сушка образцов проводилась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105...110 °С.

Математическая обработка данных эксперимента проводилась с помощью программного комплекса Microsoft Excel и Mathcad.

В работах [4, 5] установлено, что жидкостекольные вяжущие композиции на основе термоактивированного каолина проявляют достаточно высокую активность только при использовании жидких стекол с силикатным модулем 1,0...1,5 и плотностью не ниже 1,25 г/см<sup>3</sup>. Поэтому предварительно в исследованиях использовалось жидкое стекло с силикатным модулем 1,5 и плотностью 1,3 г/см<sup>3</sup>.

Результаты исследования влияния содержания ШКП на нормальную густоту смешанных вяжущих приведены на рис. 1 и показывают, что увеличение содержания пыли влечет прямо пропорциональный рост нормальной густоты теста вяжущих. Нормальная густота шамотно-каолиновой пыли составляет 36,7 %.

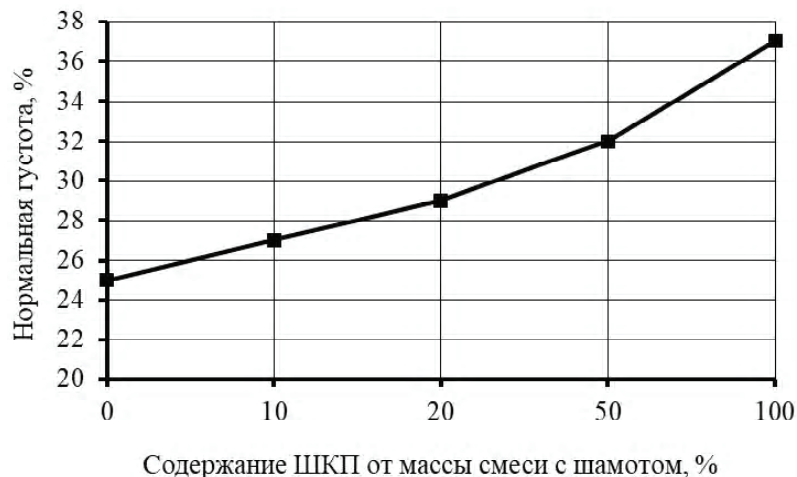
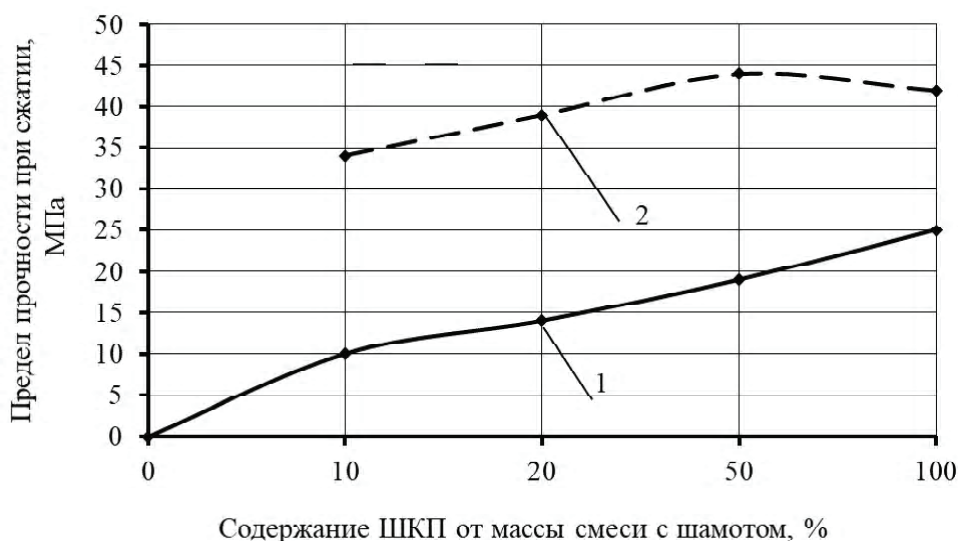


Рисунок 1 – Влияние добавки ШКП на нормальную густоту теста вяжущих.

Исследовано влияние содержания добавок шамотно-каолиновой пыли на предел прочности камня вяжущих при сжатии. Установлено, что ШКП проявляет структурообразующую способность при введении в состав алюмосиликатных жидкостекольных вяжущих (рис. 2). При использовании ШКП



**Рисунок 2** – Влияние содержания добавки ШКП на предел прочности камня вяжущих при сжатии: 1 – после 28 суток нормального твердения; 2 – после 28 суток нормального твердения и сушки при 110 °С.

в качестве отвердителя жидкого стекла активность вяжущих нормального твердения непрерывно растет. Так, при вводе 10 % добавки ШКП прочность камня вяжущего после 28 суток нормального твердения составляет 10 МПа. При 50%-ном содержании добавки прочность составляет около 20 МПа. Дальнейшее увеличение добавки ШКП незначительно влияет на прочность затвердевшего камня.

Сушка образцов приводит к значительному повышению прочности вяжущих. Так при содержании 25...35 % ШКП сушка приводит к росту прочности камня вяжущих до 40 МПа.

По полученным данным можно констатировать, что оптимальным содержанием шамотно-каолиновой пыли в составе вяжущих композиций является 25...35 %.

Для уточнения характеристик жидкого стекла по прочности образцов после нормального твердения ( $Y_1$ ) и сушки ( $Y_2$ ) был использован двухфакторный план эксперимента на трехчисленных уровнях. Исследовалось вяжущее состава «шамот + ШКП = 3 + 1», затворенное жидким стеклом с модулями 1,0; 1,5; 2,0 и плотностью 1,15; 1,225; 1,30 г/см<sup>3</sup>. Выполнены две серии испытаний: в первой – предел прочности образцов определялся после 28 суток нормального твердения; во второй – после 28 суток нормального твердения и сушки при 110 °С. В табл. 1 приведены значения варьируемых факторов.

**Таблица 1** – Значения варьируемых факторов

Код фактора	Физический смысл фактора	Единица измерения	Интервал варьирования	Уровни фактора		
				-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Силикатный модуль жидкого стекла	–	0,5	1,0	1,5	2,0
X <sub>2</sub>	Плотность жидкого стекла	г/см <sup>3</sup>	0,075	1,15	1,225	1,30

В табл. 2 приведена матрица планирования и результаты эксперимента.

Статистическая обработка данных выполнялась в программном комплексе Microsoft Excel. По результатам расчетов получены уравнения регрессии, представленные в виде полиномов второй степени:

$$Y_1 = 8,94 - 0,98 \cdot x_1 + 2,72 \cdot x_2 + 2,23 \cdot x_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 26,48 + 2,92 \cdot x_1 + 11,31 \cdot x_2 - 1,02 \cdot x_1^2 + 1,43x_2^2. \quad (2)$$

Графические интерпретации уравнений 1 и 2 получены в системе компьютерной алгебры Mathcad и представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Значение факторов				Значение параметров оптимизации	
	кодированные		натуральные			
	$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$	$Y_1$ , МПа	$Y_2$ , МПа
1	-1	-1	1,0	1,15	8,7	15,2
2	0	-1	1,5	1,15	8,2	15,4
3	+1	-1	2,0	1,15	7,4	17,3
4	-1	0	1,0	1,225	9,4	17,5
5	0	0	1,5	1,225	8,9	28,7
6	+1	0	2,0	1,225	7,5	31,3
7	м1	+1	1,0	1,30	14,6	37,9
8	0	+1	1,5	1,30	14,4	38,8
9	+1	+1	2,0	1,30	11,9	39,5

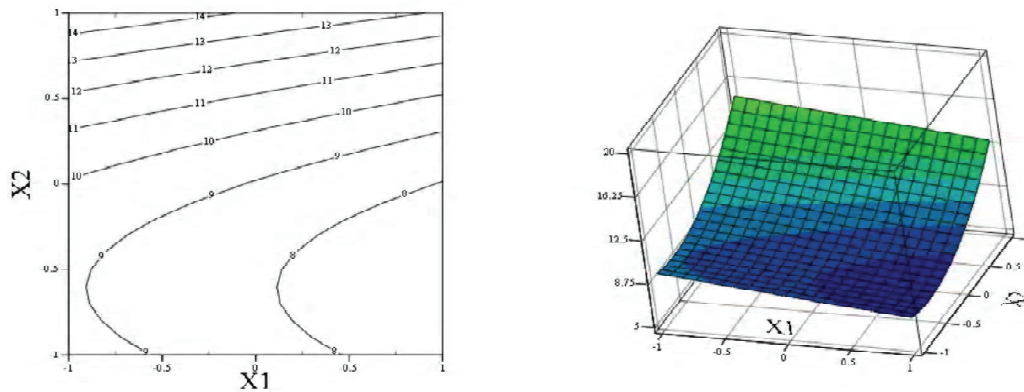


Рисунок 3 – Зависимость прочности при сжатии образцов, твердеющих при нормальных условиях ( $Y_1$ ), от силикатного модуля ( $X_1$ ) и плотности раствора ( $X_2$ ) жидкого стекла.

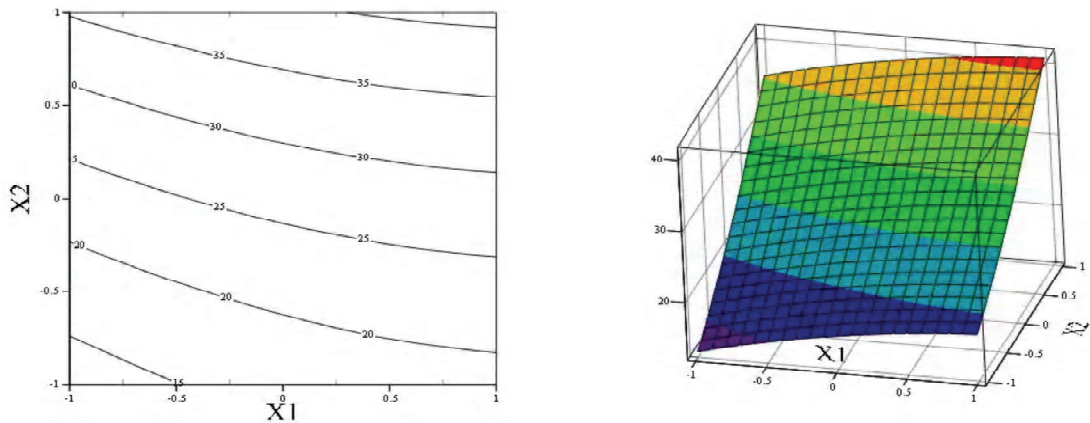


Рисунок 4 – Зависимость прочности при сжатии образцов, твердевших при нормальных условиях и высушенных до постоянной массы при 110 °С ( $Y_2$ ) от силикатного модуля ( $X_1$ ) и плотности раствора ( $X_2$ ) жидкого стекла.

Статистический анализ полученных уравнений регрессии проводился по: оценке значимости коэффициентов уравнений регрессии ( $b_0, b_1, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ ) по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 95 % и степени свободы  $f_y = 8$  (табл. 3), проверке воспроизводимости опытов (G) по Критерию Кохрена и проверке адекватности модели по критерию Фишера (F). Критерии оптимизации полученной математической модели приведены в табл. 4.

**Таблица 3** – Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии

Параметр оптимизации	Коэффициенты уравнений регрессии						Условие по критерию Стьюдента $\Delta b_i$
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$	
Прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения	8,94	-0,98	2,72	-0,54*	2,23	-0,35*	2,306
Прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения и сушки при 110 °С	26,48	2,92	11,30	-1,02	1,43	-0,14*	

**Примечание:** \* – незначимые коэффициенты уравнения согласно условию по критерию Стьюдента

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05; f_y=8)} \cdot \frac{S_y}{\sqrt{n}}$$

**Таблица 4** – Критерии оптимизации полученной математической модели

Параметр оптимизации	Дисперсия воспроизводимости параметра оптимизации $S_{y_u}^2$	Средне-квадратичное отклонение $S_{y_u}$	Воспроизводимость модели по критерию Кохрена $G_{\text{табл}} = 0,6798$	Адекватность модели по критерию Фишера $F_{\text{табл}} = 5,3177$
Прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения	0,775	0,880	0,353	2,260
Прочность при сжатии после 28 суток нормального твердения и сушки при 110 °С	0,857	0,926	0,246	4,968

По результатам исследований определены: среднеарифметические значения выходных параметров  $Y_1$  и  $Y_2$ , дисперсии воспроизводимости  $S_{y_u}^2$ , среднеквадратичные отклонения  $S_{y_u}$  (табл. 4).

Анализ полученных уравнений регрессии показал, что на прочность при сжатии образцов существенно влияет плотность раствора жидкого стекла (фактор  $X_2$ ). Повышение плотности раствора с 1,15 до 1,30 г/см<sup>3</sup> увеличивает как прочность при сжатии образцов, твердевших при нормальных условиях ( $Y_1$ ), так и прочность образцов, твердевших при нормальных условиях и высушенных при 110 °С ( $Y_2$ ). Изменение силикатного модуля жидкого стекла с 1,0 до 2,0 (фактор  $X_1$ ) оказывает меньшее влияние на прирост прочности. При этом у высушенных образцов при  $M_s = 2,0$  наблюдается снижение прочности по сравнению с  $M_s = 1,5$ , что отражено в уравнении 1.

## ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что шамотно-каолиновая пыль при введении в состав алюмосиликатных жидкостекольных вяжущих проявляет структурообразующую способность при нормальных условиях твердения. Сушка образцов вяжущих приводит к значительному повышению прочности при сжатии. Таким образом, можно констатировать, что смесь ШКП может быть эффективным заменителем термоактивированного каолина в качестве отвердителя жидкостекольных шамотных бетонов. В результате статистической обработки экспериментальных данных оптимизированы характеристики жидкого стекла, вводимого в состав композиций. Полученные результаты показали, что оптимальными характеристиками жидкого стекла для разработанных вяжущих композиций являются: силикатный модуль в пределах 1,0–1,5, а плотность от 1,25 до 1,30 г/см<sup>3</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенников, С. Г. Состояние Российской металлургии и огнеупорной промышленности на рубеже третьего тысячелетия / С. Г. Сенников, С. Н. Фокин. – Текст : непосредственный // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 1. – С. 49–56.
2. Абызов, В. А. Выбор рациональной области применения промотходов в керамике жаростойких бетонов [Текст] / В. А. Абызов. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – № 25. – С. 29–34.



3. Жуков, В. В. Жаростойкие бетоны и перспективы их применения / В. В. Жуков – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. «Стройматериалы». – 1999. – № 4. – С. 13–16.
4. Деркач, М. В. Алюмосиликатные и кремнеземистые огнеупорные бетоны с повышенными термомеханическими свойствами : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Деркач Михаил Васильевич ; Донбасская государственная академия строительства и архитектуры. – Макеевка, 2002. – 22 с. – Текст : непосредственный.
5. Огнеупорные бетоны на основе растворимых силиката и алюмината натрия с огнеупорными отвердителями / А. Н. Ефремов, М. В. Деркач, Т. П. Киценко [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2004. – Вип. 1(43). – В 2 томах, т. 2. – С. 90–93.
6. Тарасова, А. П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе / А. П. Тарасова. – Москва : Стройиздат, 1982. – 132 с. – Текст : непосредственный.
7. Корнеев, В. И. Растворимое и жидкое стекло / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. – Санкт Петербург : Стройиздат СПб., 1996. – 214 с. – Текст : непосредственный.
8. Корнеев, В. И. Производство и применение жидкого стекла : Жид. стекло / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. – Ленинград : Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1991. – 175 с. – Текст : непосредственный.

Получена 22.12.2020

Т. П. КИЦЕНКО, Д. Г. МАЛИНИН, К. О. ТИМОШЕНКО  
ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ АЛЮМОСИЛІКАТНИХ В'ЯЖУЧИХ  
КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ ШАМОТНО-КАОЛІНОВОГО ПИЛУ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Встановлено, що суміш шамотно-каолінового пилу може бути ефективним заміником термоактивованого каоліну як отверджувач рідкоскляних шамотних в'язучих. Дослідження показали, що шамотно-каоліновий пил при введенні до складу алюмосилікатних рідкоскляних в'язучих проявляє структуротвірну здатність за нормальних умов твердіння. Сушіння зразків в'язучих призводить до значного підвищення міцності при стиску. Виконано статистичне опрацювання результатів експерименту з оптимізації характеристик рідкого скла, що вводиться до складу вогнетривких алюмосилікатних в'язучих композицій на основі шамотно-каолінового пилу. Статистичне опрацювання експериментальних даних показало, що оптимальними характеристиками рідкого скла в алюмосилікатних в'язучих є: силікатний модуль в межах 1,0...1,5, а щільність від 1,25 до 1,30 г/см<sup>3</sup>.  
**Ключові слова:** силікат натрію, вогнетривкі в'язучі, рідке скло, щільність, силікатний модуль, шамотно-каоліновий пил.

TATYANA KITSSENKO, DENIS MALININ, CATHERINE TIMOSHENKO  
OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF ALUMINOSILICATE BINDERS  
BASED ON CHAMOTTE-KAOLIN DUST  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** It is established that a mixture of chamotte-kaolin dust can be an effective substitute for thermally activated kaolin as a hardener for liquid-glass fireclay binders. Studies have shown that chamotte-kaolin dust, when introduced into the composition of aluminosilicate liquid-glass binders, exhibits a structure-forming ability under normal hardening conditions. Drying of the binder samples leads to a significant increase in compressive strength. Statistical processing of the results of an experiment to optimize the characteristics of liquid glass introduced into the composition of refractory aluminosilicate binders based on chamotte-kaolin dust is performed. Statistical processing of experimental data showed that the optimal characteristics of liquid glass in aluminum-silicate binders are: silicate modulus in the range of 1.0–1.5, and density from 1.25 to 1.30 g/cm<sup>3</sup>.

**Key words:** sodium silicate, refractory binders, liquid glass, density, silicate module, chamotte-kaolin dust.

**Киценко Татьяна Петровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: огнеупорные вяжущие и бетоны.

**Малинин Денис Геннадиевич** – аспирант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: неавтоклавные быстротвердеющие пенобетоны на основе шлакощелочных вяжущих.

**Тимошенко Екатерина Александровна** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: огнеупорные вяжущие и бетоны.

**Кіценко Тетяна Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вогнетривкі в'язучі та бетони.

**Малинін Денис Геннадійович** – аспірант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: неавтоклавні швидкотверді пінобетони на основі шлаколузких в'язучих.

**Тимошенко Катерина Олександрівна** – магистрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вогнетривкі в'язучі та бетони.

**Kitsenko Tatyana** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: refractory binders and concretes.

**Malinin Denis** – graduate student, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: Scientific interests: non-autoclave fast-hardening foam concrete based on slag-alkaline binders.

**Timoshenko Catherine** – master's student, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: refractory binders and concretes.

УДК [339.133:675.6]:330.4

**В. Н. КИБЗУН, Н. П. НАГОРНАЯ**

ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»

**СЕГМЕНТАЦИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МЕХОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В ТОРГОВОМ  
ПРЕДПРИЯТИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА НИХ**

**Аннотация.** Цель работы – совершенствование методов прогнозирования экономических показателей торгового предприятия. Предложена экономико-математическая модель формирования спроса меховых изделий. Данная модель строится в виде уравнений регрессии – одно- и многофакторных переменных. В процессе исследования проведен сравнительный анализ прогнозируемых экономических показателей предприятия и построена модель спроса меховых изделий в виде уравнения связи их товарооборота и количества (потребления) каждого вида мехового изделия и его цены. При прогнозировании спроса меховых изделий были использованы полиномиальные и линейные уравнения. Использована также имитационная модель, которая позволяет предсказать и анализировать динамику возможных ситуаций в будущем и оценивать последствия проверяемых стратегий с целью нахождения оптимальной. Это позволяет целенаправленно воздействовать на систему и управлять проходящими в ней процессами. Показана эффективность метода экспертных оценок для оценки объема спроса. Предложена блок-схема экономико-математического моделирования спроса населения на конкретный товар.

**Ключевые слова:** спрос, сегментация потребителей, меховые изделия, степень удовлетворения потребностей.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В современных условиях формирование ассортимента меховых изделий является основой успешного бизнеса в торговле. В то же время нет научно-обоснованных подходов к сегментации потребителей меховых изделий в торговом предприятии и прогнозирования спроса на них. Формирование оптимального ассортимента меховых изделий осуществляется в основном под влиянием факторов, определяющих спрос потребителей на рынке и возможности их закупки. Однако отсутствует единый подход к изучению спроса на меховые изделия и его прогнозирование. Не выделяются показатели ассортимента меховых изделий, важные для потребителей и специалистов торговли, такие как экономичность ассортимента, эластичность, оптимальность, а также количественные характеристики (полнота, ширина, новизна и другие).

**Целью работы является** сегментация потребителей меховых изделий и прогнозирование спроса на них.

**ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Меховая одежда, обладает комплексом положительных свойств и пользуется постоянным спросом покупателей. Она предназначена для защиты тела от холода, а также служит предметом украшения.

Изменения, происходящие в последние годы в экономике страны, затрагивают и меховую промышленность. Несмотря на интенсивное развитие текстильной, швейной и трикотажной промышленности, выпускающих одежду из самых разнообразных материалов, значение меха как одежного материала не ослабевает.

Природная красота меха, высокие теплозащитные и эксплуатационные свойства предопределяют его успех. Достоинствами меха являются также его долговечность и возможность многократной реставрации. Мех почти неподвластен изменчивому влиянию моды и времени.

© В. Н. Кибзун, Н. П. Нагорная, 2021

Глубокое и всестороннее изучение современного ассортимента меховых товаров и перспектив его изменения на рынке являются одной из важнейших предпосылок для развития торговли этими товарами.

В последнее время в продаже стало появляться много новых, более модных моделей меховых товаров как отечественного, так и импортного производства, стали лучше удовлетворяться возросшие потребности населения в разных меховых изделиях. Проблема заключается в необходимости обеспечить полноту ассортимента меховых товаров, улучшить качество и эстетические свойства, создать условия, при которых покупатель имел бы возможность без лишних затрат времени приобрести изделия нужного размера, модели, цены.

В работе проведена сегментация потребителей меховых изделий реализуемых в ООО «Евлогите». В связи с этим была разработана анкета для проведения социологического опроса потенциальных покупателей меховых изделий и проведен опрос. Большая часть (85 % от общего количества) выборки составили жители Донецка. Опрос проводился в основном в ООО «Евлогите». В анкетировании участвовало 150 респондентов.

Данные были обработаны с помощью методов математической статистики с использованием программы EXCEL.

На основе анализа ассортимента реализуемых меховых изделий и предпочтений покупателей в работе рассмотрена динамика и составлен прогноз платежеспособного спроса меховых изделий на основе типологии в ООО «Евлогите» г. Донецк. При выборе наиболее эффективного метода анализа рынка, в том числе меховых изделий, берут во внимание классификации. Все эти методы можно разделить на три группы: полевые испытания, математический анализ, машинная имитация.

Имитационное моделирование использует в основном машинную имитацию и является перспективным инструментом анализа сложных систем и процессов. Машинная имитационная модель – это отражение на вычислительной машине численных характеристик исследуемого процесса во взаимосвязанной форме. Подобно математическим моделям они основаны на символическом описании конкретного процесса и в этом их существенное сходство. Однако, если в математической модели можно получить решение, выраженное аналитически, имитационная модель дает возможность лишь «проигрывать» выбираемые случайно или целенаправленно различные решения, определяемые набором численных характеристик. Это позволяет предсказать и анализировать динамику возможных ситуаций в будущем, и тем самым оценивать последствия проверяемых стратегий с целью нахождения наилучшей. Другим важным свойством имитационных моделей является «анализ чувственности» решений по отношению к варьированию исходных предпосылок.

Имитационная модель помогает выявить не лучшие решения, что «хорошо» для широкого набора условий, которые могут изменяться под влиянием неконтролируемых внешних факторов. Машинная имитация основана на многократной машинной и человеко-машинной имитации моделируемой системы в чрезвычайно ускоренном масштабе времени с использованием случайных элементов и с последующей обработкой полученных статистических результатов. Последнее дает возможность оценить показатель системы как среднее значение по данным большого количества реализации (имитации) работы системы. Это позволяет целенаправленно воздействовать на систему и управлять происходящими в ней процессами. Говоря о методах математического анализа, следует иметь в виду, что в зависимости от степени определения постановки проблем и условий их решения встречается три типа задач;

1. Детерминированные задачи, возникающие в ситуациях, когда считается, что каждая выбираемая стратегия приводит к единственному результату;

2. Вероятные (в условиях риска) задачи, возникающие в ситуациях, когда использование каждой стратегии может дать различные результаты, вероятности достижения которых известны или могут быть оценены;

3. Задачи в условиях неопределенности, возникающие в ситуациях, когда точно неизвестно, какие результаты могут быть получены при выборе той или иной стратегии из числа рассматриваемых или вообще не известен набор результатов. Возможно, что предлагаемые результаты и стратегии их получения известны, но ничего не известно о вероятности их реализации.

Для решения задач первого типа используется широкий набор математических методов, например математического программирования. И хотя для решения проблем маркетинговой деятельности детерминированные задачи не являются типичными, для их решения могут быть использованы матрицы или графики.

Для планирования объема выпуска (реализации) с помощью матрицы следует исходить из производственных возможностей, но и учитывать емкость рынка. При выборе лучшей альтернативы с

помощью критерия математического ожидания полезности следует руководствоваться тем, что полезность не пропорциональна прибыли, особенно когда ставки высоки. При увеличении прибыли полезность также увеличивается, но в меньшей степени: при уменьшении прибыли полезность уменьшается с увеличивающейся скоростью. Однако полезность практически пропорциональна прибыли в пределах «нормального диапазона». При принятии решения в условиях неопределенности чаще всего используют критерии типа мини-макси.

При принятии решения в условиях почти полного отсутствия информации желательно провести маркетинговые исследования.

Отправным моментом в решении задач изучения и прогнозирования спроса является сбор исходной информации. Основным ее источником являются данные торговой статистики о динамике и структуре реализации товаров через торговую сеть и материалы денежных доходов населения, демографическая статистика, статистика розничных цен и др.

Для оценки объема спроса нередко используют различные методы экспертных оценок. Их сущность заключается в сборе и анализе мнений представительного числа компетентных специалистов. Для опроса экспертов разрабатываются специальные опросные листы. Данные экспертных оценок обрабатываются с помощью специальных математических методов, позволяющих различать структурные элементы спроса, оценивать достоверность и надежность результатов и т. п. Прогнозирование спроса населения заключается в проведении специального научного исследования, предметом которого являются перспективы развития спроса. Прогноз спроса является поисковым и заключается в определении вероятностного описания возможных состояний в будущем, в методическом плане основным инструментом любого прогноза является экстраполяция. Формальная экстраполяция базируется на предположении о сокращении в будущем прошлых и настоящих тенденций развития спроса.

Основой ее является изучение временных рядов динамики развития спроса (ретроспективный анализ), затем подбор по ним аппроксимирующей функции.

Состояние прогноза по построенной модели заключается в вычислении значений факторов влияния и времени.

В основе прогнозирования лежат аналогии экстраполяции и модели будущего состояния системы. Соответственно можно выделить три различных способа разработки прогнозов – анкетирование (опрос), экстраполирование, моделирование. На практике все способы и методы прогнозирования дополняют друг друга. Метод экономико-математического моделирования содержит совокупность приемов разработки прогнозов в целом, поэтому позволяет получать большую объективность (рис. 1).

Спрос населения находится под воздействием множества факторов. Причем в экономико-математическую модель можно включить только количественно измеряемые факторы, и кроме того, не все, а наиболее существенные. Такими факторами являются: денежные доходы населения, розничные цены товаров, размер и состав семьи и др.

Кроме них, необходимо выделить группу специфических факторов формирования спроса на конкретный товар. В этом случае проводят детальный анализ и определяют степень влияния отдельных факторов, например посредством коэффициента корреляции, коэффициента эластичности спроса, параметров управления регрессии. Сокращение числа факторов можно проводить путем их агрегирования. Факторы принято разделять на экзогенные, т. е. внешние по отношению к моделируемому объекту, и эндогенные, т. е. внутренние присущие моделируемому процессу.

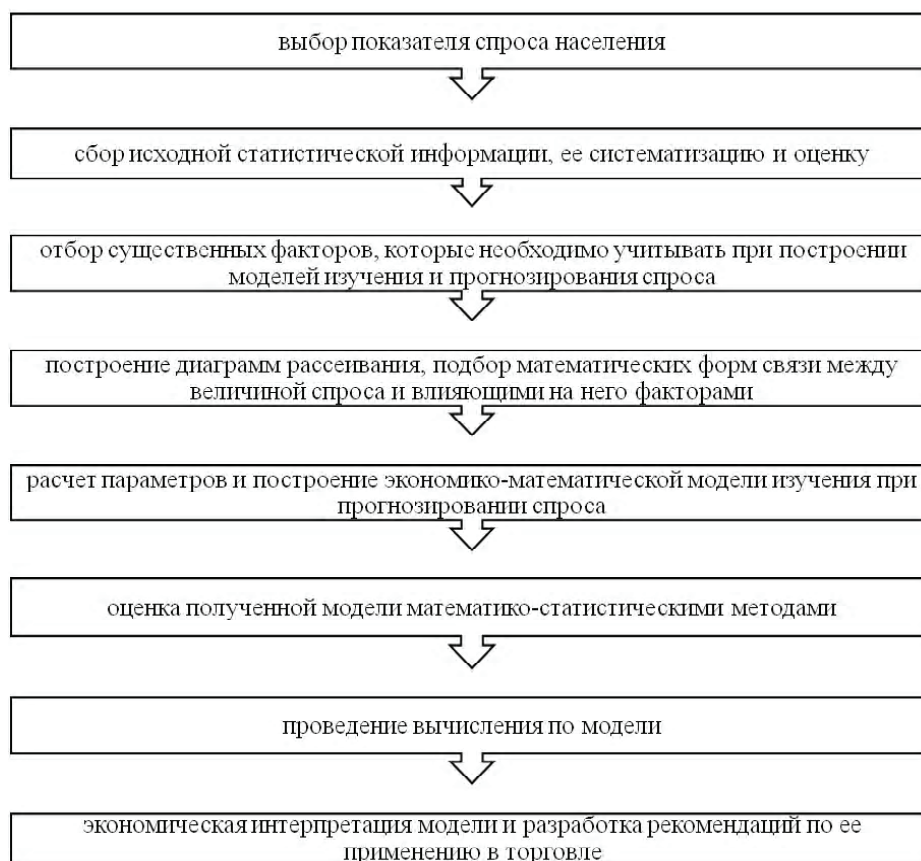
К экзогенным факторам относится практически вся совокупность воздействующих на спрос факторов.

К эндогенным факторам относится общая тенденция развития спроса на конкретный товар. В модель эндогенный фактор вводится в виде специального фактора – тренда.

Поскольку на спрос влияет большое количество факторов, задачу моделирования приходится упрощать путем выделения несущественных и существенных факторов, последние из которых и включают в модель.

Для моделирования спроса населения применяются методы и модели корреляционно – регрессионного анализа. При этом экономико-математические модели спроса строятся в виде уравнений регрессии – одно – или много факторных, в которых в качестве независимых переменных выступают формирующие спрос факторы, а в качестве зависимой переменной – спрос населения.

При математическом анализе внешние условия могут быть охарактеризованы распределением вероятностей. Математический анализ проводится для оценки характеристик различных ситуаций на рынке, а также для выбора оптимальной стратегии. Однако маркетинговые процессы на рынке



**Рисунок 1** – Экономико-математическое моделирование спроса населения.

обычно настолько сложны, что представить и решить их с помощью математических уравнений практически невозможно.

В статье дано определение величины спроса на меховые изделия в торговом предприятии ООО «Евлогите» с использованием метода математического анализа.

В общем случае модель спроса меховых изделий можно записать в виде уравнения связи их товарооборота и количества (потребления) каждого вида мехового изделия и его цены.

Рассмотрим двухфакторную модель регрессии. Для этого была построена двухфакторная линейная модель регрессии взаимосвязи  $Y$  от  $x_1$ ;  $x_2$  по данным табл. 1 ( $Y$  – товарооборот предприятия,  $x_1$  – товарооборот меховых изделий (тыс. руб.),  $x_2$  – количество изделий (штук).)

**Таблица 1** – Товарооборот предприятия, в том числе по меховым изделиям (2019 г.)

№	Период, 2019 г.	Товарооборот предприятия, $Y$ , млн руб.	Товарооборот меховых изделий, $x$ , млн руб.	Количество изделий $x_2$ , штук
1	январь	86,5	1,70	19
2	февраль	115,1	0,57	19
3	март	36	0,88	9
4	апрель	28,1	1,04	9
5	май	32,3	0,68	7
6	июнь	23,6	0,66	6
7	сентябрь	51,1	0,84	10
8	октябрь	55,9	0,86	11
9	ноябрь	56,6	1,27	14
10	декабрь	16,6	0,86	33

Уравнение модели ассортимента меховых изделий имеет вид:

$$Y_x = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2. \quad (1)$$

Тогда, искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_x = -0,352159 - 43,7719 x_1 + 84,82513 x_2. \quad (2)$$

Анализ параметров найденной модели следующий: если товарооборот меховых изделий  $x_1$  уменьшится случайным образом на 1 тыс. руб., товарооборот предприятия  $Y$  в среднем уменьшится на  $a = -43,77$  тыс. руб. при условии, что количество реализуемых меховых изделий  $x_2$  остается без изменений. Аналогично, если количество реализуемых меховых изделий  $x_2$  измениться на единицу своего измерения, товарооборот предприятия  $Y$  измениться на 84,825 тыс. руб., при неизменном товарообороте предприятия  $x_1$ . Проверку значимости модели проводят на основании показателей тесноты связи между  $Y_\phi$  (фактическим)  $Y$ . Расчет остаточной дисперсии  $\sigma_{\text{ост}}^2$  и процентов отклонения приведен в таблице 2.

**Таблица 2** – Определение остаточной  $\sigma_{\text{ост}}^2$  дисперсии и процента отклонения  $K\%$  и процента отклонения по модулю  $|K|\%$

№	$Y_\phi$	$Y_m$	$Y_\phi - Y_m$	$(Y_\phi - Y_m)$	$K\%$	$ K \%$
1	86,5	86259		0,0578739	0,2781	0,27812
2	115,1	117,91	-2,808	7,887101,3	-2,44	2,43996
3	36	39,024	-3,024	9,1431116	-8,3993	8,39933
4	28,1	29,476	-1,376	1,8920004	-4,895	4,89502
5	32,3	28,268	4,0316	16,2,54143	12,482	12,4819
6	23,6	24,054	-0,454	0,206377	-1,9249	1,92495
7	51,1	50,105	0,9946	0,9892,324	1,9464	1,94638
8	55,9	55,168	0,7323	0,5362345	1,31	1,30998
9	56,6	56,731	-0,131	0,0171666	-0,2315	0 23149
Итого	159,6	1,57,81	1,7939	3,2179711	1,124	1,12398
Итого				40,201212		35,0311
Дисперсия остаточная $\sigma_{\text{ост}}^2$				5,743030	$\bar{K}\%$	7,004
		$\sigma_{\text{ост}}$		2,396462		

Остаточная дисперсия  $\sigma_{\text{ост}}^2 = 5,74333$ . Процент отклонения по отдельным значениям выборки изменяются от  $K = -0,23$  до  $12,48\%$ . Средний процент отклонения для уравнения регрессии в целом составляет  $K\% = 7,00\%$ .

Множественный коэффициент корреляции  $R$  равен коэффициенту корреляции между фактическими и теоретическими значениями объясняемой переменной, он вычисляется по формуле:

$$R = r_{yy} = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \bar{y}_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \bar{y}_i\right)^2}}. \quad (3)$$

**Таблица 3** – Расчет элементов коэффициента корреляции  $R$

$\sum_{i=1}^n y_i^2$	$\sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2$	$\sum_{i=1}^n y_i \bar{y}_i$
58 827,86	5 878	58 788,42
$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n \bar{y}_i$	$R$
644,8	644	0,9988

Вспомогательные вычисления для расчета множественного коэффициента корреляции, выполненные с использованием функций программы EXCEL, сведены в таблицу 3. Приведено в ней и значение множественного коэффициента корреляции  $R = 0,9988$ , что свидетельствует о тесной линейной корреляционной связи  $Y$  с  $X_2$  и  $X_1$ .

Итак, множественный коэффициент корреляции  $R = 0,9988$ . Чем ближе  $R$  к единице, тем лучше данная модель описывает фактические данные. В рассматриваемом случае значение множественного

коэффициента корреляции достаточно велико, что указывает на хорошую согласованность

теоретических данных с фактическими. Доверительный интервал для множественного коэффициента корреляции определяется по формуле (4):

$$R - \Delta_R \leq R_f \leq R + \Delta_R, \quad (4)$$

где 
$$\Delta_R = \frac{t_{кр}(1-R^2)}{\sqrt{n-m-1}}.$$

По таблицам критическое значение критерия Стьюдента  $E_p(n-m-1; \alpha) = 1_{кр}(n=10, t=2, \alpha=0,05) = 2,365$

$$\Delta_R = \frac{2,365(1-0,99787)}{\sqrt{10-2-1}} = 0,002.$$

Поскольку множественный коэффициент корреляции не может быть больше 1, то интервал принимает вид:  $0,998 \leq R \leq 1$ .

Таким образом, с вероятностью ошибки в 5 % можно утверждать, что фактический коэффициент корреляции не меньше, чем 0,998. Коэффициент детерминации  $R^2$  определяет долю общей дисперсии относительно среднего  $\bar{Y}$ , которую можно объяснить уравнением регрессии. В нашем случае  $R^2 = 0,99767-0,998$ . Следовательно, 99,8 % дисперсии показателя  $Y$  можно подтвердить с помощью построенной модели зависимости от товарооборота меховых изделий  $X_2$  (единиц).

Проверка адекватности уравнения регрессии по критерию Фишера: ( $F$  – статистика):

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = \frac{0,6341}{1-0,6341} \cdot \frac{10-2-1}{2} \approx 6,0649. \quad (5)$$

По таблицам критерия Фишера критическое значение для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ :

$$F_{кр}(n-m-1, m, \alpha) = F_{кр}(7; 2; 0,05) = 4,74. \quad (6)$$

Фактическое значение статистики больше критического  $F > F_{кр}$  ( $6,0649 > 4,74$ ). Следовательно, уравнение 5 является адекватным.

Анализируя таблицу 4, можно отметить, что спрос на меховые изделия в торговом предприятии в 2019 году вырос по сравнению с 2017 годом на 9,4 %. Установлено, что спрос на меховые изделия вырос за счет количества проданных изделий (табл. 4).

**Таблица 4** – Реализация меховых изделий в ООО «Евлогите» в 2017–2019 г.г., прогноз на 2020–2021 г.г. (штук)

	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Одежда	70	85	96	112	122
Головные уборы	58	45	40	30	20
Всего	128	130	136	144	160

Используя данные таблицы 4, в работе составлен прогноз потребления меховых изделий в ООО «Евлогите» по видам. В табл. 4 и на рис. 2 представлены данные об ассортименте меховых изделий в ООО «Евлогите» за 2017–2019 г.г. и прогноз на 2020–2021 г.г.

Как видно реализация одежды в ООО «Евлогите» в 2020 г. ожидается из 112 моделей, в 2021 г. – 122 изделия. Реализация меховых головных уборов будет снижаться и составит 30 изделий в 2020 г., а в 2021 г. 20 изделий.

При прогнозировании спроса меховых изделий были использованы полиномиальные и линейные уравнения. Прогноз составлен на 2020 и 2021 г.г.

Уравнение модели прогноза реализации ассортимента одежды ( $y$ ) имеет вид (рис. 2):

$$y = 13x + 57,66. \quad (7)$$

При этом коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,992$ .

Уравнение модели прогноза реализации ассортимента головных уборов ( $y$ ) имеет вид:

$$y = -9x + 65,56. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,938$ .



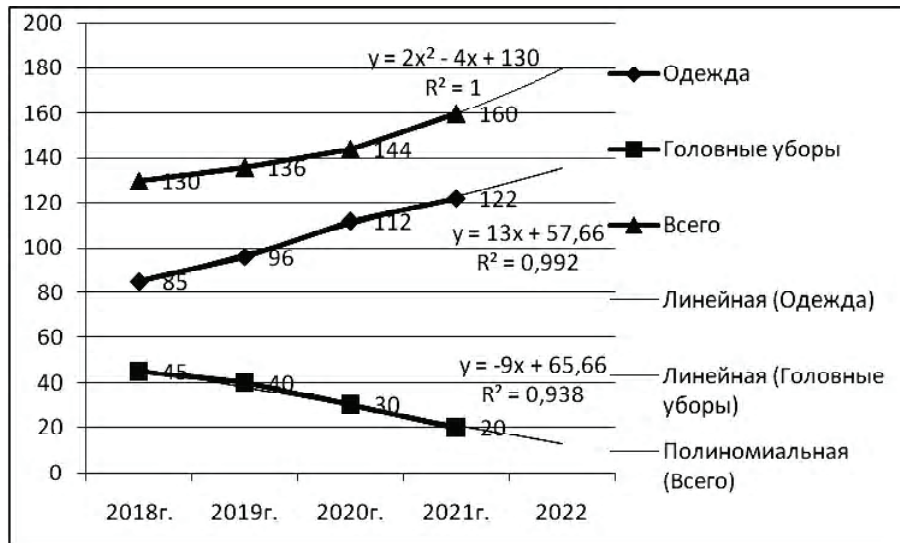


Рисунок 2 – Реализация и прогнозирование спроса на меховые изделия в ООО «Евлогите».

Уравнение модели прогноза реализации ассортимента общего количества меховых изделий имеет вид (рис. 2):

$$Y = 2x^2 - 4x + 130 \quad (9)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 1$ .

Как следует из данных рис. 2 реализация пальто и полупальто будет увеличиваться. В реализации меховой одежды выросла доля жилетов. Это объясняется их удобством в использовании, достаточно хорошим качеством, разнообразием фасонов и видов полуфабрикатов, сравнительно невысокой ценой. Снижается реализация головных уборов.

Поэтому работникам ООО «Евлогите» г. Донецка следует приложить все усилия для поддержки их реализации.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что для оценки сегментации потребителей меховых изделий целесообразно использовать такие социально-экономические показатели, как динамику цен, товарооборот. При моделировании спроса на меховые изделия использован метод корреляционно-регрессионного анализа. При этом экономико-математическая модель спроса строится в виде уравнения регрессии одно- или многофакторной. В качестве независимых переменных должны выступать формирующие спрос факторы, а в качестве зависимых переменных – спрос населения, денежные доходы населения, розничные цены на изделия, размер и состав семьи и другое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Статистика, 1980. – 263 с., ил. – (Математическая статистика для экономистов). – Текст : непосредственный.
2. Боровков, А. А. Математическая статистика. Дополнительные главы : учебное пособие для вузов / А. А. Боровков. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 144 с. – Текст : непосредственный.
3. Ефримов А. Н. Предсказание случайных процессов / А. Н. Ефримов. – Москва : «Знание», 1976. – 64 с. – Текст : непосредственный.
4. Испирян, Г. П. Математические методы в планировании и управлении на предприятиях легкой промышленности / Г. П. Испирян, В. Д. Рожок. – Киев : «Техника», 1974. – 300 с. – Текст : непосредственный.
5. Кулиш, С. А. Математические методы в планировании материально-технического снабжения : [учебное пособие для экономических специальностей вузов] / С. А. Кулиш, С. Н. Воловельская, И. А. Рабинович. – Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1972. – 228 с. – Текст : непосредственный.

Получена 23.12.2020

В. М. КІБЗУН, Н. П. НАГОРНА  
СЕГМЕНТАЦІЯ СПОЖИВАЧІВ ХУТРЯНИХ ВИРОБІВ У ТОРГОВОМУ  
ПІДПРИЄМСТВІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА НИХ  
ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла  
Туган-Барановського»

**Анотація.** Мета роботи – вдосконалення методів прогнозування економічних показників торгового підприємства. Запропоновано економіко-математичну модель формування попиту хутряних виробів. Дана модель будується у вигляді рівнянь регресії – одно- і багатофакторних змінних. У процесі дослідження проведено порівняльний аналіз прогнозованих економічних показників підприємства та побудовано модель попиту хутряних виробів у вигляді рівняння зв'язку їх товарообігу і кількості (споживання) кожного виду хутряного виробу і його ціни. При прогнозуванні попиту хутряних виробів були використані поліноміальні і лінійні рівняння. Використана також імітаційна модель, яка дозволяє передбачити і аналізувати динаміку можливих ситуацій в майбутньому і оцінювати наслідки стратегій, що перевіряються з метою знаходження оптимальної. Це дозволяє цілеспрямовано впливати на систему і управляти процесами, що проходять в ній. Показана ефективність методу експертних оцінок для оцінки обсягу попиту. Запропоновано блок-схему економіко-математичного моделювання попиту населення на конкретний товар.

**Ключові слова:** попит, сегментація споживачів, хутряні вироби, ступінь задоволення потреб.

VALENTINA KIBZUN, NINA NAGORNAYA  
SEGMENTATION OF CONSUMERS OF FUR PRODUCTS IN A COMMERCIAL  
ENTERPRISE AND FORECASTING DEMAND FOR THEM  
State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of  
Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky»

**Abstract.** The purpose of the work is to improve the methods of forecasting the economic indicators of a trading enterprise. An economic and mathematical model of the formation of demand for fur products is proposed. This model is built in the form of regression equations – one and multivariate variables. In the course of the study, a comparative analysis of the forecasted economic indicators of the enterprise was carried out and a model of the demand for fur products was built in the form of an equation for the relationship between their turnover and the amount (consumption) of each type of fur product and its price. When forecasting the demand for fur products, polynomial and linear equations were used. A simulation model was also used, which allows predicting and analyzing the dynamics of possible situations in the future and evaluating the consequences of tested strategies in order to find the optimal one. This allows you to purposefully influence the system and control the processes taking place in it. The effectiveness of the method of expert estimates for assessing the volume of demand is shown. A block diagram of economic and mathematical modeling of population demand for a specific product is proposed.

**Key words:** demand, consumer segmentation, fur products, degree of satisfaction of needs

**Кібзун Валентина Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского». Научные интересы: исследование потребительных свойств одяжно-обувных товаров.

**Нагорная Нина Павловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Кібзун Валентина Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та експертизи непродовольчих товарів ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського». Наукові інтереси: дослідження споживчих властивостей одягово-взуттєвих товарів.

**Нагорна Ніна Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та експертизи непродовольчих товарів ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини у компоненти композиційних матеріалів.

**Kibzun Valentina** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Commodity Research and Expertise of Non Foodstuff Department, State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky». Scientific interests: research of consumer properties clothing – footwear products.

**Nagorna Nina** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Commodity Research and Expertise of Non Foodstuff Department, State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky». Scientific interests: development of effective technologies of processing of technogenic raw material in components of composition materials.

УДК 678.686

**Ю. С. КОЧЕРГИН, В. В. ЗОЛОТАРЕВА**

ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СМЕСИ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА С БЛОК-СОПОЛИМЕРОМ ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ПОЛИТЕТРАМЕТИЛЕНОКСИД**

**Аннотация.** В широком интервале температур исследовано влияние модифицирующей добавки термоэластопласта на деформационно-прочностные свойства эпоксидных композитов. В качестве термоэластопласта использован двублочный блок-сополимер полибутилентерефталат-политетраметиленоксид (ПБТ-ПТМО) с молекулярной массой 35 тысяч и содержанием эластомерных блоков ПТМО 70 масс. % и жестких блоков ПБТ 30 масс. %. Установлено, что модифицированный полимер при содержании ПБТ-ПТМО до 10 масс. ч. характеризуется более высокой температурой стеклования. Показано, что в стеклообразном состоянии полимеров значения прочности при растяжении для исходного и модифицированного образцов практически совпадают, а в высокоэластическом состоянии прочность модифицированного эпоксиды ощутимо выше, чем у немодифицированного. Методом электронной микроскопии установлено образование в эпоксидной матрице отдельных фаз, сформированных эластомерными и жесткими блоками. Показано, что добавка ПБТ-ПТМО в эпоксидные полимеры приводит к увеличению работы разрушения материала, повышает их ударо-, тепло-, морозо- и химстойкость без снижения показателей прочности и модуля упругости.

**Ключевые слова:** эпоксидный полимер, термоэластопласт, блок-сополимер полибутилентерефталат-политетраметиленоксид, модификация, структура, деформационно-прочностные свойства.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

До настоящего времени не теряет актуальности поиск модификаторов, способствующих эффективному расширению температурного интервала эксплуатации и повышению адгезионной прочности эпоксидных композитов. В этом плане большой интерес представляют термопластичные каучуки, так называемые термоэластопласты (ТЭП) [1–7], которые представляют собой блок-сополимеры строения (АВА) и (АВ)<sub>n</sub>, где А – жесткие блоки термопластов, В – гибкие эластомерные блоки. Ниже температуры стеклования жесткого компонента эти материалы обладают очень хорошей прочностью и эластичностью, а при более высоких температурах – текучестью, свойственной линейным полимерам. При отсутствии обычных химических сшивок это явление можно понять, рассматривая домены жесткой фазы как полифункциональные узлы пространственной сетки.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Термоэластопласты представляют собой двухфазные блок-сополимеры, где каждый из блоков выполняет определенную функцию. Эластичный блок определяет гибкую эластомерную природу сополимера, а жесткий играет роль узлов физической сетки и наполнителя. Такое поведение является следствием двухфазности этих систем. Из-за микрофазового разделения жесткие блоки ассоциируют друг с другом, образуя маленькие дисперсные домены (0,01...0,02 мкм), которые химически связаны с каучуковой матрицей. Эти домены выполняют ту же функцию, что и химическая сетка в вулканизированных эластомерах [7]. Домены сетки ТЭП размягчаются или плавятся при температурах выше их температуры стеклования или плавления жесткого блока, и, таким образом, возможна переработка материалов через расплав. Другая функция жестких доменов заключается в повышении прочности путем усиления каучуковой матрицы. Это возможно из-за дискретной природы

жестких доменов, их малых размеров и идеальной однородности по размеру, отличной адгезии между фазами, обусловленной наличием химических связей между блоками.

Свойства ТЭП зависят от молекулярной массы и объемной доли эластичных и жестких блоков [8–13]. Блоки должны быть достаточной длины, чтобы возникла двухфазная структура, однако не слишком длинными, чтобы при этом сохранялась термопластичность. Изменение соотношения жесткого и эластичного блоков влияет на модуль упругости и деформационно-прочностные свойства. Термопластичные эластомерные свойства ТЭП делают их уникальными для многих областей промышленности – в производстве автомобилей и механизмов, в электротехнике и электронике, в производстве уплотнителей, уплотняющих составов, клеев, обуви, искусственных органов и протезов, полупроницаемых мембран [14–16].

Среди ТЭП большее практическое значение имеют блок-сополимеры на основе полибутилентерефталата и политетраметиленаоксида. Эти термоэластопласты весьма удачно сочетают в себе свойства полибутилентерефталата и политетраметиленаоксида, имеющих самостоятельное значение [17–21]. Как известно, полибутилентерефталат (ПБТ) является высококристаллическим термопластичным полимером конструкционного назначения с температурой плавления 496÷500 К и температурой стеклования 309÷322 К [22, 24]. Степень кристалличности ПБТ составляет 50 %. Кристаллизация ПБТ из расплава протекает очень быстро, что позволяет проводить его переработку с коротким циклом. Высокая текучесть полимера дает возможность получить литьевые изделия с длинными или сложными литьевыми каналами. Плотность полимера равна 1 270÷1 310 кг/м<sup>3</sup>. Известно использование ПБТ в качестве модификатора эпоксидных смол с целью повышения ударной вязкости [24]. Установлено, что ПБТ оказался в 2 раза более эффективным, чем ранее применяемые термопласты (ПА-6, поливинилиденфторид и др.).

Политетраметиленаксид (ПТМО) – простой эфир, который в зависимости от молекулярной массы представляет собой бесцветную вязкую жидкость или твердое бесцветное кристаллическое вещество со степенью кристалличности 33–80 %, температурой плавления 314÷328 К, температурой стеклования 187 К и плотностью от 990 до 1 180 кг/м<sup>3</sup> [25].

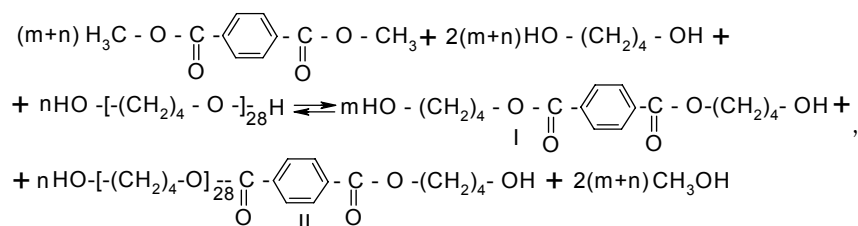
В связи с изложенным несомненный интерес представляет исследование термоэластопластов в качестве модификаторов эпоксидных полимеров. Благодаря наличию эластичного блока в их составе можно ожидать увеличения ударостойкости в широком интервале температур и адгезионной прочности. Одновременное насыщение эпоксидной матрицы жесткими блоками БСП с высокой температурой размягчения позволяет рассчитывать на сохранение теплостойкости и модуля упругости.

**Целью** настоящей работы является исследование влияния модифицирующих добавок блок-сополимеров полибутилентерефталат-политетраметиленаксид на деформационно-прочностные свойства и химстойкость эпоксидных композиционных материалов.

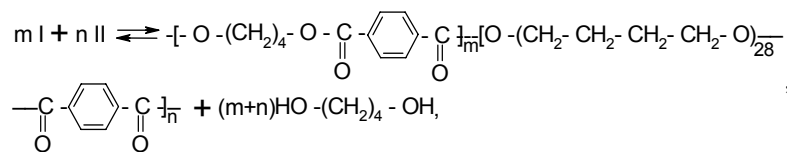
#### Методология

В качестве объектов исследования выбраны эпоксидные полимеры (ЭП) на основе диглицидилового эфира бисфенола А, которые получали отверждением промышленной смолы марки ЭД-20 с массовой долей эпоксидных групп 21,4 % и молекулярной массой 410. Отвердителем служил диэтилентриаминометилфенол марки УП-583Д.

В качестве модификатора ЭП использовали блок-сополимер полибутилентерефталат-политетраметиленаксид (ПБТ-ПТМО), синтез которого осуществляли в расплаве при 483–523 К в течение 4–6 ч. Исходными соединениями являлись диметилтерефталат, 1,4-бутандиол и политетраметиленаксид с молекулярной массой 2 000. В качестве катализатора реакции использовали тетрабутоксититан. Процесс взаимодействия исходных компонентов осуществляли в две стадии, последовательно проводя реакцию переэтерификации:



и сополиконденсации:



где  $m$  и  $n$  – коэффициенты уравнения.

Состав БСП задавали соотношением исходных реагентов. Молекулярная масса синтезированного БСП составляла около 35 тысяч.

Для исследования нами был выбран БСП с содержанием жестких блоков полибутилентерефталата 30 масс. % и эластомерных блоков политетраметилепоксида 70 масс. %. Он имеет следующие характеристики: приведенная вязкость 1,7 дл/г; температура 5 % потери массы на воздухе 523К; прочность при растяжении 9,5 МПа; удлинение при разрыве 818 %; модуль упругости 13 МПа (деформационно-прочностные свойства измерены на пленочных образцах, полученных методом полива растворов БСП в хлороформе на целлофановую подложку). Совмещение БСП с эпоксидной смолой осуществляли при 393К. Отверждение продуктов совмещения проводили по режиму 293 К / 240 ч + 393 К / 3 ч.

Механические свойства при одноосном растяжении (разрушающее напряжение  $\sigma_p$  и деформацию при разрыве  $\epsilon_p$ ) определяли на приборе типа Поляни с жестким динамометром и автоматической регистрацией измеряемых величин [26]. Скорость деформирования составляла  $3,83 \cdot 10^{-5}$  м/с. Модуль упругости (E) рассчитывали по наклону начального участка кривой  $\sigma$ - $\epsilon$ . Мерой работы разрушения ( $A_p$ ) служила площадь под кривой напряжение – деформация.

Электронно-микроскопические исследования проводили методом двухступенчатых реплик с крупного скола. В качестве первичной реплики использовали 2%-й раствор желатины, на которую затем напылялась угольно-палладиевая реплика.

Параметр растворимости определяли расчетным путем по формуле [27]:

$$\delta = \left( \frac{\sum \Delta E_i^*}{N_A \sum \Delta V_i} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta E_i$  – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в величину эффективной мольной энергии когезии;  
 $N_A$  – число Авогадро;  
 $\Delta V_i$  – вандерваальсовый объем молекулы, складывающийся из вандерваальсовых объемов атомов.

Водопоглощение определяли по изменению массы пленок в зависимости от времени пребывания в воде по формуле:

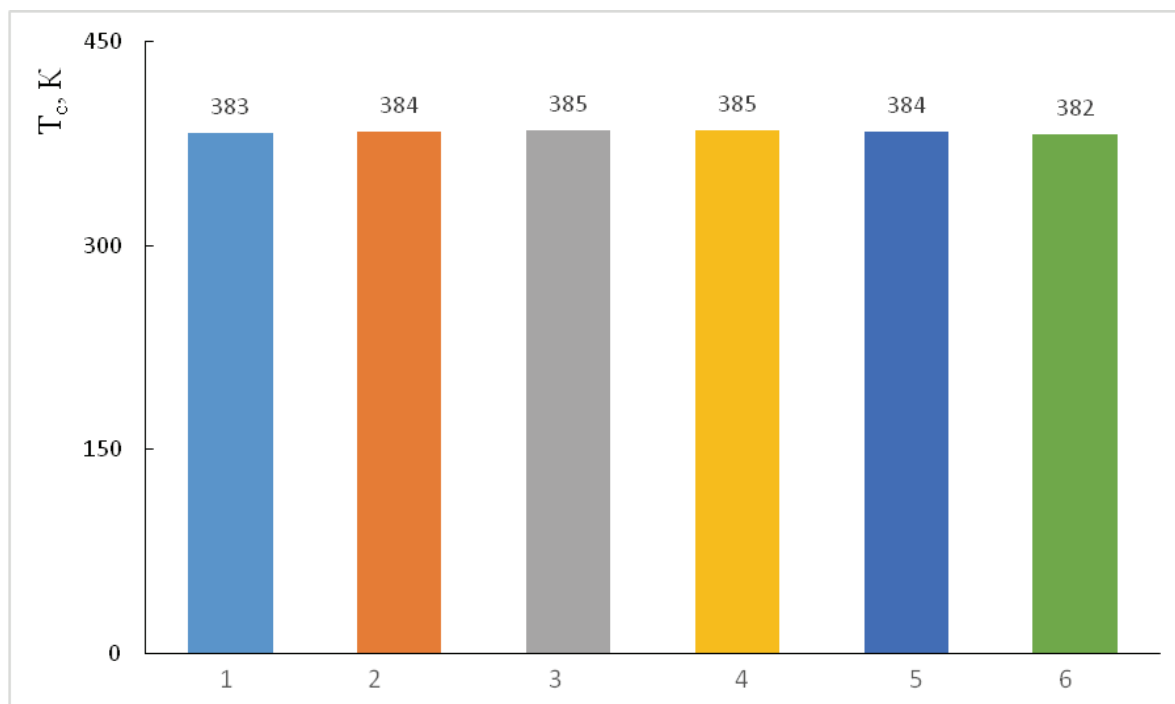
$$w(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $m_0$  – начальная масса образца;  
 $m(t)$  – масса образца после пребывания в воде в течение времени  $t$ .

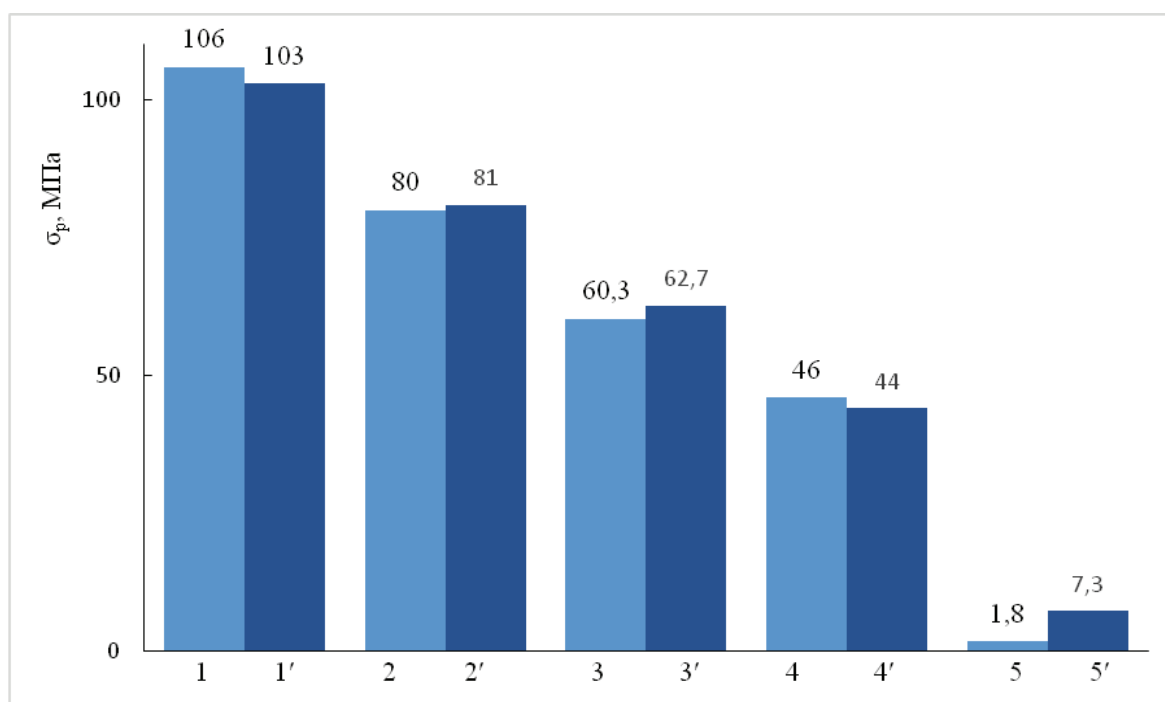
## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На рис. 1 представлена зависимость температуры стеклования ( $T_g$ ) от количества введенного блок-сополимера. Видно, что при малых концентрациях (C) модификатора наблюдается небольшое увеличение  $T_g$ , а затем при  $C > 7$  масс. ч. имеет место снижение температуры стеклования.

Как следует из данных рис. 2, прочность образцов ( $\sigma_p$ ) закономерно убывает с ростом температуры испытания как для исходного эпоксиды, так и модифицированного образца. При этом в широком диапазоне температур от 153 до 353 К (т. е. во всем исследованном интервале стеклообразного состояния полимера) прочности исходного и модифицированного образцов практически совпадают, а при температуре 423 К, когда образцы находятся в высокоэластическом состоянии,  $\sigma_p$  модифицированного эпоксиды ощутимо выше, чем у немодифицированного.

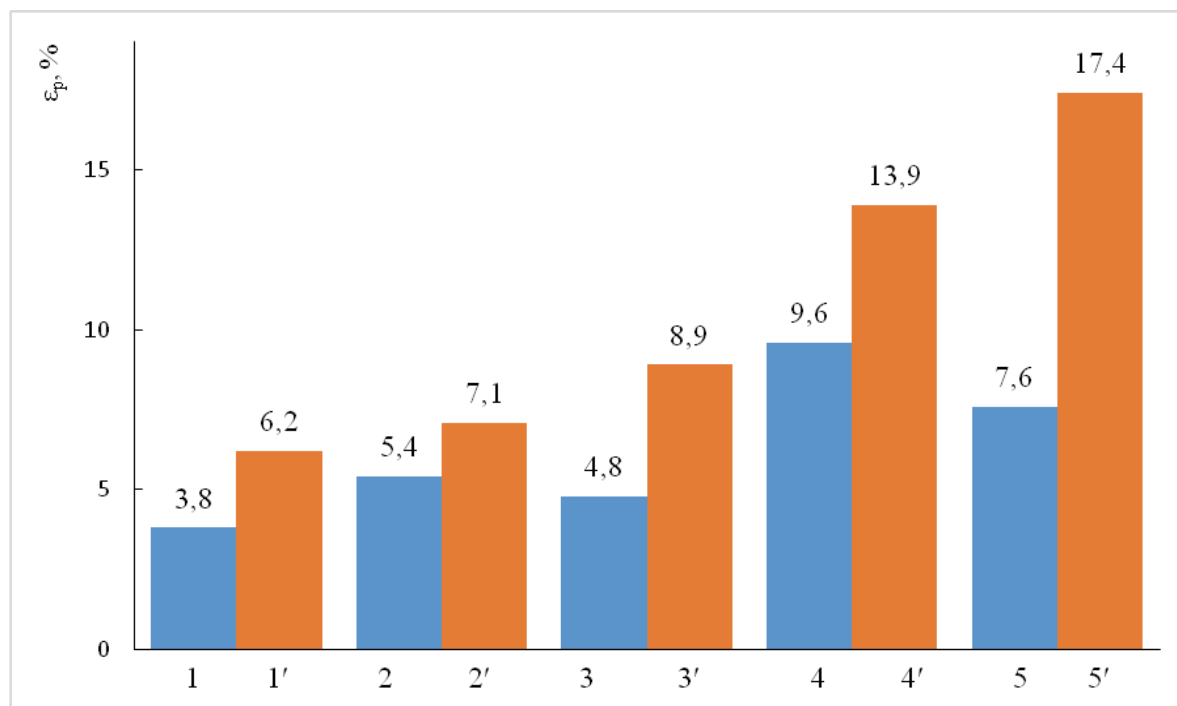


**Рисунок 1** – Зависимость температуры стеклования  $T_g$  от количества модификатора. Содержание ПБТ-ПТМО равно: 0 (1), 3 (2), 5 (3), 7 (4), 10 (5) и 15 (6) масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы.



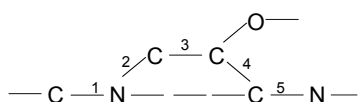
**Рисунок 2** – Зависимость прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) от температуры испытания для исходного (1–5) и модифицированного 10 масс. ч. ПБТ-ПТМО (1'–5') эпоксидного полимера, температура испытания 153 (1, 1'), 213 (2, 2'), 295 (3, 3'), 353 (4, 4') и 423 (5, 5') К.

Деформация образцов при разрыве ( $\epsilon_p$ ), в отличие от прочности, растет с увеличением температуры (рис. 3). Причем для образца на основе модифицированной смолы наблюдается монотонный рост  $\epsilon_p$ , а для исходного эпоксида после первоначального увеличения  $\epsilon_p$  в температурном диапазоне 153–213 К происходит некоторое уменьшение деформации при повышении температуры до 295 К. В



**Рисунок 3** – Зависимость деформации при разрыве ( $\epsilon_p$ ) от температуры испытания для исходного (1–5) и модифицированного 10 масс. ч. ПБТ-ПТМО (1'–5') эпоксидного полимера, температура испытания 153 (1, 1'), 213 (2, 2'), 295 (3, 3'), 353 (4, 4') и 423 (5, 5') К.

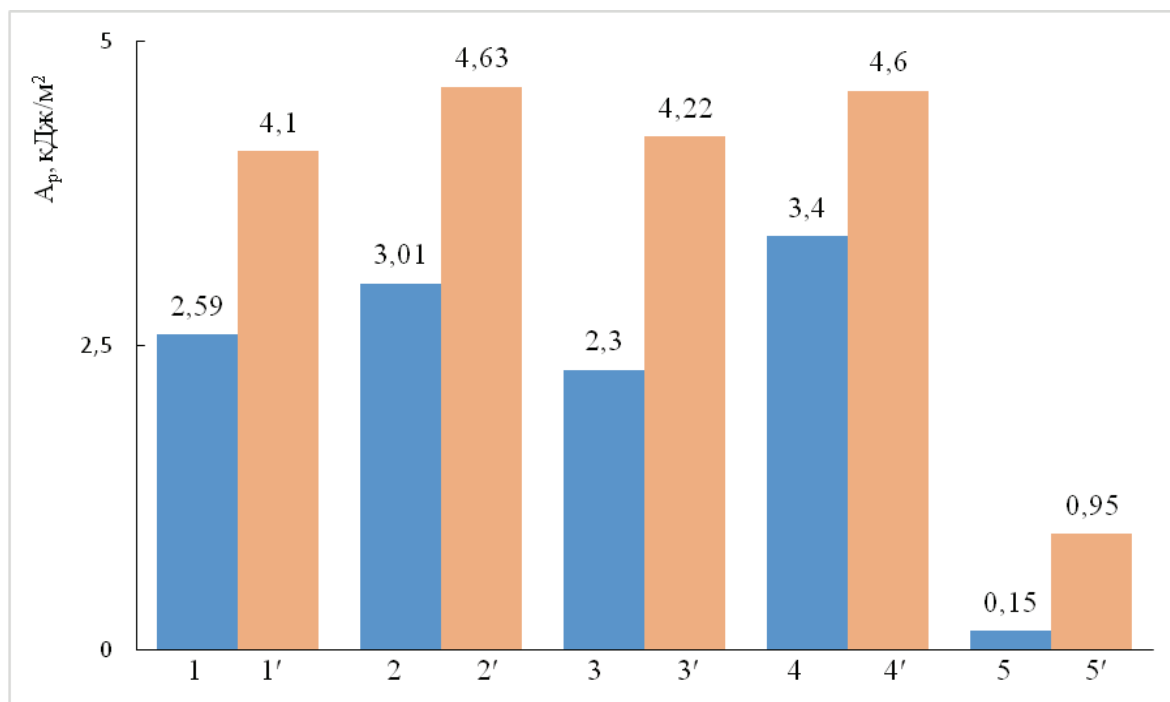
результате образец при пониженной температуре обладает большей деформативностью, чем при комнатной температуре. Это явление тесно связано с молекулярной подвижностью в эпоксидной матрице. Как известно [28], при температуре примерно 213 К в эпоксиде происходит размораживание движения небольшого участка молекулярной цепи в точке соединения узлов химической сетки по механизму коленчатого вала (крэнкшфта) [29]:



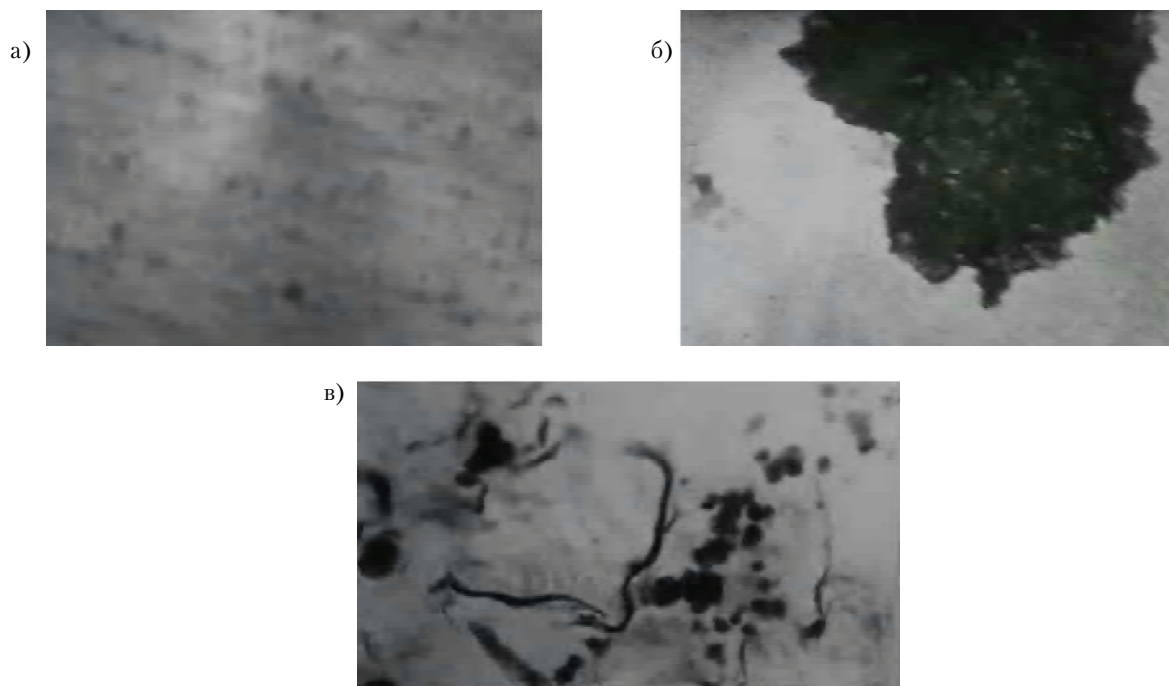
Проявление подвижности этого фрагмента, по-видимому, привносит дополнительный вклад в увеличение  $\epsilon_p$ . Следующее после роста в температурном диапазоне 295...353 К снижение деформации  $\epsilon_p$  при температуре 423 К может быть связано с окончанием молекулярной подвижности вблизи температуры  $T_c$  (383К), связанной с переходом полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Добавка ПБТ-ПТМО в эпоксидный полимер приводит к увеличению работы разрушения материала ( $A_p$ ). Как видно из рис. 4, образец на основе модифицированной смолы превосходит исходный эпоксид во всем исследованном интервале температур. Эффект в равной мере проявляется как при пониженных (ниже комнатной), так и повышенных температурах испытания. Причина повышения  $A_p$  при введении ПБТ-ПТМО заключается, на наш взгляд, в следующем. Известно [27, 28], что высокой работой разрушения характеризуются полимерные смеси, имеющие микрогетерогенную структуру, у которых температура стеклования одной из фаз намного ниже комнатной температуры. Для исследуемых систем в силу существенного различия в параметрах растворимости ПТМО и ЭП (соответственно 16,5 и 20,5 (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>0.5</sup>) также наблюдается микрорасслоение, что подтверждают результаты электронно-микроскопических исследований (рис. 5). Было установлено, что при введении в эпоксидную матрицу ПТМО наблюдается образование частиц второй фазы неправильной формы размером ~ 3 мкм (рис. 5б). Причем эта фаза является результатом агрегации более мелких образований с некоторым количеством окклюзированной эпоксидной смолы. В случае модификации блок-сополимерами наряду с надмолекулярными структурами, образованными фазами ПТМО





**Рисунок 4** – Зависимость работы разрушения ( $A_p$ ) от температуры испытания для исходного (1–5) и модифицированного 10 масс. ч. ПБТ-ПТМО (1'–5') эпоксидного полимера, температура испытания 153 (1, 1'), 213 (2, 2'), 295 (3, 3'), 353 (4, 4') и 423 (5, 5') К.



**Рисунок 5** – Электронные микрофотографии с поверхности скола исходного полимера (а) и модифицированного 10 масс. ч. ПТМО (б) и ПБТ-ПТМО (в). Увеличение 15 000х.

размерами до 1 мкм, формируются также структуры длиной до 3 мкм, которые, по-видимому, образованы жесткими блоками ПБТ (рис. 5в).

Однако одного фазового разделения (даже с учетом того факта, что  $T_c$  ПТМО составляет 187 К, т. е. значительно меньше комнатной температуры) оказывается тем не менее недостаточно для

обеспечения значительного модифицирующего эффекта. Ранее [29, 30] на примере эпоксидных полимеров, модифицированных жидкими олигобутадиеновыми каучуками, было показано, что не менее важным фактором, способствующим увеличению  $A_p$  (помимо фазового разделения), является химическое связывание частиц каучуковой фазы с эпоксидной матрицей за счет реакции этерификации карбоксильных групп каучука и оксирановых циклов в ЭП. Можно предположить, что в случае БСП такое связывание осуществляется за счет блоков ПБТ, которые, будучи хорошо совместимыми с эпоксидной матрицей (параметр растворимости ПБТ равен  $20,9 \text{ (МДж/м}^3)^{0,5}$ ), могут диффундировать в нее, обеспечивая тем самым достаточно прочное сцепление эластомерной фазы ПТМО с эпоксиполимером.

Модификация ЭП блок-сополимерами ПБТ-ПТМО, как видно из данных таблицы, позволяет увеличить химическую стойкость. Зависимость водопоглощения от концентрации добавки БСП имеет экстремальный характер, причем минимальное водопоглощение наблюдается при малом (~ 3 масс. ч.) содержании ТЭП. Аналогичные зависимости имеют место и в случае выдержки образцов в спирте и бензине.

Результаты расчета плотности поперечного сшивания ( $\rho_c$ ) по величине равновесного модуля высокоэластичности свидетельствуют об увеличении густоты химической сетки в ЭП при введении в него ПБТ-ПТМО (таблица). Следует однако отметить, что в случае определения полноты отверждения ЭП методом экстракции имеет место обратная картина, а именно доля экстрагируемых веществ возрастает при введении БСП, что, по-видимому, обусловлено вымыванием модифицирующих добавок при выдержке образцов в ацетоне (таблица).

**Таблица** – Влияние блок-сополимера полибутилентерефталат-политетраметиленоксид на полноту отверждения и химстойкость эпоксидных полимеров

Концентрация модификатора, масс. ч., на 100 масс. ч. эпоксидной смолы	Плотность узлов химической сетки $\rho_c$ , кмоль/м <sup>3</sup>	Экстракция в ацетоне, %	Водопоглощение, %, через 24 ч	Набухание, %, через 24 ч.	
				спирт	бензин
0	0,81	2,42	2,10	0,95	0,84
3	1,07	2,95	0,87	0,26	0,55
5	1,16	4,12	1,15	0,31	0,38
10	1,16	5,84	1,52	0,37	0,23
15	1,16	6,07	1,67	0,42	0,25

\*Примечание: рассчитана по величине равновесного модуля высокоэластичности, измеренного при температуре  $T_c + 50 \text{ К}$ .

## ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что блок-сополимер полибутилентерефталат-политетраметиленоксид является эффективным модификатором эпоксидных полимеров, повышающим их ударостойкость, тепло- и морозостойкость без снижения показателей прочности и модуля упругости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов, М. В. Повышение ударо-и трещиностойкости эпоксидных реактопластов и композитов на их основе с помощью добавок термопластов как модификаторов / М. В. Лобанов, А. И. Гуляев, А. Н. Бабин. – Текст : непосредственный // Высокомолекулярные соединения. – Сер. Б. – 2016. – Т. 58, № 1. – С. 3–15.
2. Вольфсон, С. И. Структура, свойства, применение термоэластопластов для композиционных материалов нового поколения / С. И. Вольфсон. – Текст : непосредственный // Вестник КГТУ. – 2001. – Спецвыпуск. – С. 26–46.
3. Ношей, А. Блок-сополимеры / А. Ношей, Дж. Мак-Грат. – Москва : Мир, 1980. – 480 с. – Текст : непосредственный.
4. Коврига, В. В. Композиционные материалы в промышленности : часть 3 / В. В. Коврига. – Текст : непосредственный // Пластические массы. – 2003. – № 1. – С. 4–14.
5. Исследование физико-химических свойств и структурных параметров диенвинилароматических термоэластопластов как полимерной основы адгезионных соединений / Т. Н. Дорохова, Л. Р. Люсова, А. А. Попов [и др.]. – Текст : непосредственный // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – № 2. – С. 22–26.

6. Люсова, Л. Р. Особенности клеев на основе бутадиен-стирольных термоэластопластов / Л. Р. Люсова, Т. Н. Дорохова. – Текст : непосредственный // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. 2011. – Т. 6, № 6. – С. 109–112.
7. Вольфсон, С. И. Влияние рецептурно-технологических параметров на молекулярную структуру динамически вулканизованных ТЭП / С. И. Вольфсон. – Текст : непосредственный // Каучук и резина. – 2003. – № 6. – С. 16–17.
8. Зеленов, Ю. В. Исследование взаимосвязи состава, строения, структуры и физических свойств блок-сополимеров на основе гибко- и жесткоцепных компонентов / Ю. В. Зеленов. – Текст : непосредственный // Пласт. массы. – 2002. – № 3. – С. 11–18.
9. Synthesis of block copolymer by internated living cationic polymerization (ATRP) / B. Liu, F. Liu, N. Luo [et al.]. – Текст : непосредственный // J. Polym. Sci. – 2000. – Vol. 18, № 1. – P. 39–43.
10. Свойства клеевых соединений на основе термоэластопластов ДСТ-30-01 и ДСТ-30Р-01 / В. А. Евтушенко, Т. Н. Дорохова, Д. Ю. Небратенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Каучук и резина. – 2010. – № 4. – С. 29–31.
11. О выборе растворителя для клеев на основе изопрен-стирольных термоэластопластов / Л. Р. Люсова, А. Ю. Семина, М. В. Холостина [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. – 2013. – Т. 8, № 4. – С. 109–112.
12. Lu, Z. Synthesis, characterization and hydrolysis of PVAc-PS-PVAc via charge transfer polymerization / Z. Lu, X. Huang, J. Nauang. – Текст : непосредственный // J. Polym. Sci. Ser. A. – 1999. – Vol. 37, № 14. – P. 2595–2600.
13. Патент 6500900 США, МПК7 С 08 L 23/26. Olefin thermoplastic elastomer, composition and use thereof : № US 6,500,900 B1 : заявл. 25.10.2000 : опубл. 31.10.2002 / Itoh Y. ; Assignee: Mitsui Chemicals, Inc., Tokyo. – 12 p. – Текст : непосредственный.
14. Патент 6576699 США, МПК7 С 08 L 53/00. Damping resin composition and molded article using the same : № USO6576699B2 : заявл. 26.11.1997 ; опубл. 10.06.2003 / Nakagawa H., Mizutani H., Koizumi J. ; Toyoda Gosei Co., Ltd. – 13 p. – Текст : непосредственный.
15. Патент 6184290 США, МПК7 С 08 L 47/00. Block copolymer compositions containing substantially inert thermoelastic extenders : № US6184290B1 : заявл. 16.12.1997 ; опубл. 06.02.2001 / Ahmed Wasif K., Batistini A., Betso S. R., Guest M. J. ; The Dow Chemical Co. – 27 p. – Текст : непосредственный.
16. Thermoplastic elastomers based on ABA triblock copolymers and a polyester / H. Schmalz, V. Abetz, R. Stalder [et al.]. – Текст : непосредственный // 38th Macromolecular IUPAC Symposium, (Warsaw, 9–14 July 2000). – Warsaw : Book Abstr, 2000. – Vol. 3. – P. 989.
17. Алакаева, З. Т. Термические свойства нанокомпозитных блок-сополимеров на основе полибутилтерефталата и политетраметилоксида / З. Т. Алакаева, М. А. Микитаев, О. Б. Леднев. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 10. – С. 12–15.
18. Микитаев, А. К. Полибутилтерефталат, полиэфирные термоэластопласты, композиционные материалы на их основе / А. К. Микитаев, И. П. Сторожук. – Текст : непосредственный // Пласт. массы. – 1999. – № 1. – С. 30.
19. Патент 2389743 Россия МПК C08L63/00, C08L71/02 Эпоксидные смолы, упрочненные амфильными блок-сополимерами, и порошковые покрытия, выполненные на их основе : № 2007121664 : заявл. 11.12.2005 : опубл. 20.05.2010 / Верхгесе К. И., Франка М. ; Дау глобал технолоджиз инк. (US). – Бюл. № 14. – 21 с. – Текст : непосредственный.
20. Шелгаев, В. Н. К вопросу о термостабильности полибутилтерефталата / В. Н. Шелгаев, А. К. Микитаев, С. М. Ломакин. – Текст : непосредственный // Пласт. массы. – 2002. – № 3. – С. 29–32.
21. Разработка отечественного полибутилтерефталата с улучшенными характеристиками / И. П. Сторожук, В. Н. Шелгаев, А. К. Микитаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Пласт. массы. – 2002. – № 2. – С. 23–27.
22. Розенберг, Б. А. Тетрагидрофурановые полимеры / Б. А. Розенберг. – Текст : непосредственный // Энциклопедия полимеров: в 3 т, т. 1. – Москва : Советская энциклопедия, 1977. – С. 641–643.
23. Малкин, А. Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин, А. А. Аскадский, В. В. Коврига. – Москва : Химия, 1978. – 336 с. – Текст : непосредственный.
24. Аскадский, А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – Москва : Химия, 1983. – 248 с. – Текст : непосредственный.
25. Перепечко, И. И. Акустические методы исследования полимеров / И. И. Перепечко. – Москва : Химия, 1973. – 296 с. – Текст : непосредственный.
26. Ван Кревелен, Д. В. Свойства и химическое строение полимеров / Д. В. Ван Кревелен ; [перевод с английского] / Под редакцией А. Я. Малкина. – Москва : Химия, 1976. – 415 с. – Текст : непосредственный.
27. Бабаевский, П. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций / П. Г. Бабаевский, С. Г. Кулик. – Москва : Химия, 1991. – 336 с. – Текст : непосредственный.
28. Markarian, J. Impact modifiers: how to make your compound tougher / J. Markarian. – Текст : непосредственный // Plast., Addit. and Compound. – 2004. – Vol. 6, № 3. – P. 46–49.
29. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции / Ю. С. Зайцев, Ю. С. Кочергин, М. К. Пактер, Р. В. Кучер. – Киев : Наук. думка, 1990. – 200 с. – Текст : непосредственный.
30. Кочергин, Ю. С. Клеевые композиции на основе модифицированных эпоксидных смол / Ю. С. Кочергин, Т. А. Кулик, Т. И. Григоренко. – Текст : непосредственный // Пласт. массы. 2005. – № 10. – С. 9–16.

Получена 25.12.2020

Ю. С. КОЧЕРГІН, В. В. ЗОЛОТАРЬОВА  
СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ СУМІШІ ЕПОКСИДНОГО ПОЛІМЕРУ З  
БЛОК-СОПОЛІМЕРОМ ПОЛІБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ПОЛІТЕТРА-  
МЕТИЛЕНОКСИД

ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського»

**Анотація.** У широкому інтервалі температур досліджено вплив модифікуючої добавки термоеластопласту на деформаційно-міцнісні властивості епоксидних композитів. Як термоеластопласт використано двоблочний блок-сополімер полібутилентерефталатполітетраметиленаксид (ПБТ-ПТМО) з молекулярною масою 35 тисяч і вмістом еластомерних блоків ПТМО 70 мас. % та жорстких блоків ПБТ 30 мас. %. Встановлено, що модифікований полімер при утриманні ПБТ-ПТМО до 10 мас. ч. характеризується більш високою температурою склування. Показано, що в склоподібному стані полімерів значення міцності при розтягуванні для вихідного і модифікованого зразків практично збігаються, а у високоеластичному стані міцність модифікованого епоксиду відчутно вище, ніж у немодифікованому. Методом електронної мікроскопії встановлено утворення в епоксидній матриці окремих фаз, сформованих еластомерними і жорсткими блоками. Показано, що добавка ПБТ-ПТМО в епоксидні полімери призводить до збільшення роботи руйнування матеріалу, підвищує їх ударо-, тепло-, морозо- і хімістійкість без зниження показників міцності і модуля пружності.

**Ключові слова:** епоксидний полімер, термоеластопласт, блок-сополімер полібутилентерефталат-політетраметиленаксид, модифікація, структура, деформаційно-міцнісні властивості.

YURIY KOCHERGIN, VIKTORIYA ZOLOTAREVA  
STRUCTURE AND PROPERTIES OF A MIXTURE OF AN EPOXY POLYMER  
WITH A BLOCK COPOLYMER POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE-POLY-  
TETRAMETHYLENE OXIDE

State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky»

**Abstract.** The influence of a modifying thermoelastoplast additive on the deformation and strength properties of epoxy composites was studied over a wide temperature range. A two-block polybutyleneterephthalate-polytetramethylene oxide (PBT-PTMO) copolymer with a molecular weight of 35 thousand and a content of elastomeric PTMO blocks of 70 mass. % and rigid blocks of PBT 30 mass. % was used as a thermoelastoplast. It is established that the modified polymer with a PBT-PTMO content of up to 10 wt. h. is characterized by a higher glass transition temperature. It is shown that in the glassy state of polymers, the tensile strength values for the initial and modified samples are almost identical, and in the highly elastic state the strength of the modified epoxy is significantly higher than that of the unmodified one. The formation of separate phases formed by elastomeric and rigid blocks in an epoxy matrix was determined by electron microscopy. It is shown that the addition of PBT-PTMO to epoxy polymers leads to an increase in the destruction work of the material, increases their impact, heat, frost and chemical resistance without reducing the strength and modulus of resistance

**Key words:** epoxy polymer, thermoelastoplast, polybutylene terephthalate-polytetramethylene oxide block copolymer, modification, structure, deformation and strength properties.

**Кочергин Юрий Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры общинженерных дисциплин ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского». Научные интересы: технология полимерных и композиционных материалов.

**Золотарева Виктория Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского». Научные интересы: технология полимерных и композиционных материалов.

**Кочергин Юрий Сергійович** – доктор технічних наук, професор кафедри загальноінженерних дисциплін ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського». Наукові інтереси: технологія полімерних і композиційних матеріалів.

**Золотарьова Вікторія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та експертизи непродовольчих товарів ДО ВПО «Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського». Наукові інтереси: технологія полімерних і композиційних матеріалів.

**Kochergin Yuriy** – D. Sc. (Chem. Sc.), Professor, Commodity Research and Expertise of Non Foodstuff Department, State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky». Scientific interests: technology of polymeric and composite materials.

**Zolotareva Viktoriya** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Commodity Research and Expertise of Non Foodstuff Department State Organization of Higher Professional Education «Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky». Scientific interests: technology of polymeric and composite materials.

УДК 625.756

**К. Р. ГУБА<sup>а</sup>, В. Н. КУЛИКОВ<sup>б</sup>, Э. Н. ГАБИДУЛИН<sup>б</sup>, Н. А. КОВШИК<sup>б</sup>, А. Д. ГУРИН<sup>б</sup>, С. Г. БОРИСОВ<sup>б</sup>**<sup>а</sup> Автомобильно-дорожный институт «Донецкий национальный технический университет»,<sup>б</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ МОДИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО**

**Аннотация.** Одной из основных задач в области дорожного строительного материаловедения является поиск новых материалов, которые позволят повысить физико-механические свойства асфальтобетона и тем самым увеличить сроки эксплуатации нежестких одежд автомобильных дорог. Увеличение эксплуатационного срока службы дорожных покрытий приведет к снижению затрат на их содержание и ремонт. Многочисленными исследованиями установлено, что повышение качества асфальтобетона может быть достигнуто за счет улучшения физико-механических свойств органического вяжущего. Выполнен анализ способов модификации нефтяных дорожных битумов. Установлено, что существуют два эффективных способа модификации органического вяжущего – технологический и рецептурный. Установлено, что наиболее эффективными являются рецептурные способы. Приведена классификация модифицирующих добавок нефтяных дорожных битумов. Доказано, что одним из наиболее эффективных способов модификации органических вяжущих является введение в их состав поверхностно-активных веществ.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, добавки, способы модификации асфальтобетона, классификация, битум.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Основным дорожным материалом является асфальтобетон, который в дорожной одежде подвержен перепадам температур окружающей среды, а также механическим воздействиям от нагрузок транспортных средств. При данных условиях наблюдается недостаточная эксплуатационная надежность нежестких дорожных одежд, которая приводит к образованию трещин и пластических деформаций. Поэтому решение данной проблемы связано с повышением качества асфальтобетона за счет модификации прежде всего органического вяжущего материала.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

При строительстве и ремонте дорожного покрытия автомобильных дорог используют асфальтобетон, который является искусственным композиционным материалом, состоящим из рационально подобранной смеси минеральных компонентов и органического вяжущего. В связи с этим проектирование состава асфальтобетона является одной из важных задач, направленных на исключение повреждений, которые могут возникнуть при эксплуатации дорожного покрытия [1–3].

Над решением данной проблемы в настоящее время работают и занимаются такие исследователи, как А. С. Колбановская, А. В. Руденский, И. М. Руденская, В. А. Золотарев, Л. Б. Гезенцевей, В. Б. Розенталь, В. Г. Хозин, Б. Г. Печеный, Л. М. Гохман и другие [4–11].

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Выполнить анализ способов модификации органического вяжущего и выбрать наиболее эффективный.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

В последнее время в странах ближнего и дальнего зарубежья, а также в Российской Федерации широко используют новые технологии строительства, ремонта и содержания дорожных покрытий

© К. Р. Губа, В. Н. Куликов, Э. Н. Габидулин, Н. А. Ковшик, А. Д. Гуринов, С. Г. Борисов, 2021

[3, 5, 11, 12]. В большинстве случаев разрабатываемые технологии направлены на модификацию органических вяжущих, входящих в состав асфальтобетона. Основной задачей асфальтобетона является обеспечение требуемых функциональных свойств дорожного покрытия. Поэтому разработка долговечных составов асфальтобетона является актуальным направлением, которое позволит снизить затраты на ремонт и содержание и продлит срок эксплуатации нежестких дорожных одежд.

Одним из главных компонентов, входящих в состав асфальтобетона, является органическое вяжущее (битум), свойства которого при прочих равных условиях определяют физико-механические свойства данного композиционного материала [4, 5, 7, 11]. Дорожно-строительные материалы, приготовленные на основе битума, имеют следующие недостатки:

- чувствительность к изменению температуры окружающей среды;
- низкую адгезию к поверхности минеральных материалов;
- изменение свойств во времени эксплуатации (старение, хрупкость).

Влияние перечисленных недостатков совместно с напряженным состоянием возникающим от механических, статических и динамических воздействий транспортных средств, приводит к нарушению структуры асфальтобетонных покрытий. На дорожном покрытии образуются трещины и пластические деформации, которые снижают деформационную устойчивость автомобильной дороги.

На рисунке 1 приведены два наиболее эффективных способа модификации битума, которые реализованы в настоящее время [4–11, 14, 15].



**Рисунок 1** – Способы модификации битумных вяжущих.

– технологический – основан на механическом или физическом воздействии на структуру битума [13–15];

– рецептурный – основан на введении в состав органического вяжущего или в композит дополнительных компонентов, изменяющих структуру и свойства битума [13–15].

Технологические способы включают в себя различные факторы, которые связаны с условиями приготовления органических вяжущих, асфальтобетонных смесей и физическими воздействиями (рис. 1).

При модификации битума с использованием СВЧ-печей обеспечивается равномерное распределение энергии по всей камере обработки органического вяжущего. Обработка данным способом значительно повышает адгезионное взаимодействие в системе «битум – минеральный наполнитель». Это связано с изменениями структуры битума, и прежде всего активизируется поверхностная энергия смол и асфальтогеновых кислот, что повышает прочностные характеристики асфальтобетона.

Факторами внешнего воздействия на структуру битума можно назвать: электрические, электромагнитные, магнитные, вибрационные и акустические поля. Недостатком является недостаточная изученность действия сил магнитного поля [14, 16].

Использование ультразвуковой модификации битума [14, 16] приводит к:

- снижению вязкости;
- диспергированию частиц, которые находятся в зоне действия ультразвука;
- повышению однородности;
- разрушающему действию и диспергированию коллоидных мицелл органического вяжущего.

Для того, чтобы улучшить показатели свойств битума технологическими способами, необходимо вложить значительные капиталовложения на изменения технологического процесса, понести затраты на энергию, использовать сложное оборудование. Следовательно, более доступным и простым способом модификации битума являются рецептурные способы.

Рецептурные способы модификации битума основываются на введении в битум модифицирующих добавок (рис. 1), которые могут вводиться на разных стадиях их получения и переработки [13, 17]. На сегодняшний день в литературе отсутствует полная классификация и систематизация модифицирующих добавок, что приводит к затруднению их изучения, а также к их выбору и использованию. Однако разработки продолжаются и ряд исследователей В. А. Золотарев, В. Г. Хозин, Л. М. Гохман, В. И. Братчун, А. Б. Соломенцев и др. предлагают классифицировать добавки по механизму их действия [6, 9, 11, 13, 17]. В соответствии с этим предлагается выделить следующие группы модифицирующих добавок (рис. 2).

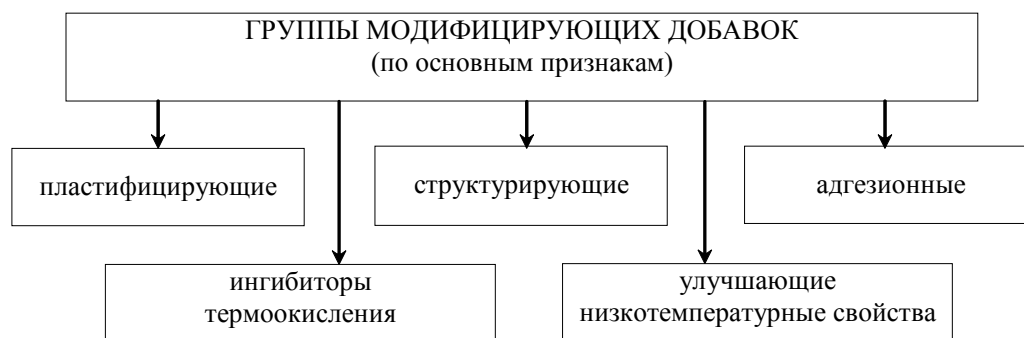


Рисунок 2 – Классификация модифицирующих добавок по основным признакам.

В работах [6, 9, 11, 13, 17] авторы предлагают классифицировать модифицирующие добавки по вспомогательным признакам (рис. 3).

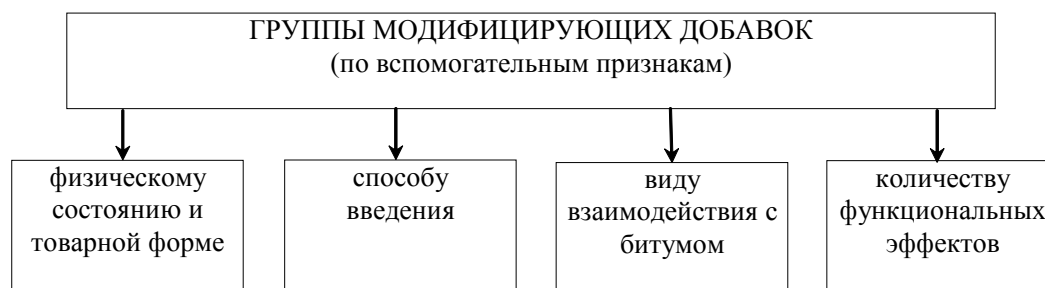


Рисунок 3 – Классификация модифицирующих добавок по вспомогательным признакам.

Предлагается и другая классификация модифицирующих добавок по обобщенным признакам [6, 9, 11, 13, 17] (рис. 4).

Анализ литературных источников свидетельствует о том, что адгезионные добавки типа ПАВ широко используются в технологии модификации асфальтобетонных смесей [13, 17]. Введение добавок типа ПАВ приводит к снижению поверхностной энергии и повышает энергию взаимодействия с поверхностью минеральных материалов [10, 13]. Это снижает температуру нагрева вяжущего и время получения однородной смеси, а также приводит к замедлению процесса старения асфальтобетонной смеси и асфальтобетона [5, 10, 14, 17].





Рисунок 4 – Классификация модифицирующих добавок по обобщенным признакам.

## ВЫВОД

Выполнив анализ литературы, можно сделать вывод о том, что для повышения качества битума существуют разнообразные способы модификации. Для выбора того или иного способа модификации битума необходимо учитывать ряд факторов, которые должны быть направлены на снижение затрат на технологические и энергетические процессы, минимизацию усложнения производственных процессов. Необходимо отметить, что процесс модификации битума должен соответствовать рациональным, эффективным и экономичным требованиям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбьев, И. А. Закономерности в структурно-механических свойствах асфальтового бетона / И. А. Рыбьев. – Текст : непосредственный // Сборник трудов ВЗИСИ. – 1957. – Т. 1. – С. 78–95.
2. Ребиндер, П. А. Научные основы технологии производства новых строительных материалов / П. А. Ребиндер, Н. В. Михайлов. – Текст : непосредственный // Вестник АН СССР. – 1961. – № 10. – С. 70–77.
3. Ковалев, Я. Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов (научно-практические основы) / Я. Н. Ковалев. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя. – 2002. – 334 с. – ISBN 985-11-0237-7. – Текст : непосредственный.
4. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, Е. В. Михайлов. – Москва : Транспорт, 1973. – 264 с. – Текст : непосредственный.
5. Руденская, И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – Москва : ИНФРА-М. – 2010. – 256 с. – ISBN 978-5-16-004482-8. – Текст : непосредственный.
6. Золотарев, В. А. Свойства битумов, модифицированных полимерами типа СБС / В. А. Золотарев. – Текст : непосредственный // Научно-виробничий журнал «Автошляховик України» / [редакційна колегія: В. Б. Агеєв, А. О. Белятинський, В. О. Богомолів та ін.]. – Киев : [б. и.]. – 2006. – С. 25–27.
7. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горельшев, А. М. Богуславский, И. В. Королев. – Москва : Транспорт. – 1985. – 350 с. – Текст : непосредственный.
8. Розенталь, Д. А. Нефтяные окисленные битумы : учебное пособие ЛТИ им. Ленсовета / Д. А. Розенталь. – Ленинград : Химия. – 1973. – 46 с. – Текст : непосредственный.
9. Хозин, В. Г. Полимеры в строительстве – реальные границы и перспективы эффективного применения / В. Г. Хозин. – Текст : непосредственный // Полимеры в строительстве: научный Интернет – журнал. – 2014. – № 1(1). – С. 9–26.
10. Печеный, Б. Г. Физико-химические основы регулирования структурных и фазовых превращений в процессах производства применения битумов : специальность 05.17.07 : автореферат диссертации на соискание ученой

- степени доктора технических наук / Печеный Борис Григорьевич ; МИНХ и ГП им. И. М. Губкина. – Москва, 1985. – 48 с. – Текст : непосредственный.
11. Гохман, Л. М. Битумы, полимернобитумные вяжущие, асфальтобетон, полимерасфальтобетон : методическое пособие для слушателей ГОУ ДПО ГАСИС / составитель : Л. М. Гохман. – Москва : Издательство ГОУ ДПО ГАСИС. – 2008. – 94 с. – ISBN 978-5-9506-0352-5. – Текст : непосредственный.
  12. Arand, W. Prognostizierung des Haftverhaltens von Asphalten mittels Spaltzugfestigkeitsabfall / W. Arand. – Текст : непосредственный // Asphalt (BRD). – 1998. – 32, № 6. – С. 18–19.
  13. Евдокимова, Н. Г. Разработка научно-технологических основ производства современных битумных материалов как нефтяных дисперсных систем : специальность 05.17.07 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Евдокимова Наталья Георгиевна ; ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина». – Москва, 2015. – 54 с. – Текст : непосредственный.
  14. Золотарев, В. А. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве. PIARC-AIPCR [перевод с французского В. А. Золотарёва, Л. А. Беспаловой]. Под общей редакцией В. А. Золотарёва, В. И. Братчуна – Харьков : Изд-во ХНАДУ. – 2003. – 229 с. – Текст : непосредственный.
  15. Шеховцова, С. Ю. Эффективный асфальтобетон на основе наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шеховцова Светлана Юрьевна ; ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – Белгород, 2016. – 192 с. – Текст : непосредственный.
  16. Лоскутова, Ю. В. Влияние магнитного поля на структурно-реологические свойства нефтей / Ю. В. Лоскутова, Н. В. Юдина. – Текст : непосредственный // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309, № 4. – С. 104–109.
  17. Соломенцев, А. Б. Классификация и номенклатура модифицирующих добавок для битума / А. Б. Соломенцев. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 1. – С. 14–16.
  18. Производство нефтяных битумов / А. А. Гуреев, Е. А. Чернышева, А. А. Коновалов, Ю. В. Кожевникова. – Москва : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2007. – 103 с. – Текст : непосредственный.

Получена 28.12.2020

К. Р. ГУБА <sup>a</sup>, В. М. КУЛИКОВ <sup>b</sup>, Е. Н. ГАБИДУЛІН <sup>b</sup>, Н. А. КОВШИК <sup>b</sup>,  
О. Д. ГУРІН <sup>b</sup>, С. Г. БОРИСОВ <sup>b</sup>

АНАЛІЗ СПОСОБІВ МОДИФІКАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО В'ЯЖУЧОГО

<sup>a</sup> Автомобільно-дорожній інститут «Донецький національний технічний університет»,

<sup>b</sup> ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Однією з основних задач в галузі дорожнього будівельного матеріалознавства є пошук нових матеріалів, які дозволять підвищити фізико-механічні властивості асфальтобетону і тим самим збільшити терміни експлуатації нежорстких одягів автомобільних доріг. Збільшення експлуатаційного терміну служби дорожніх покриттів приведе до зниження витрат на їх утримання і ремонт. Багатьма дослідженнями встановлено, що підвищення якості асфальтобетону може бути досягнуто за рахунок поліпшення фізико-механічних властивостей органічного в'язучого. Виконано аналіз способів модифікації нафтових дорожніх бітумів. Встановлено, що існують два ефективних способу модифікації органічного в'язучого – технологічний і рецептурний. Доведено, що найбільш ефективними є рецептурні способи. Наведено класифікацію добавок, якими модифікують нафтові дорожні бітуми. Доведено, що одним з найбільш ефективних способів модифікації органічних в'язучих є введення до їх складу поверхнево-активних речовин.

**Ключові слова:** асфальтобетон, добавки, способи модифікації асфальтобетону, класифікація, бітум.

KONSTANTIN GUBA <sup>a</sup>, VLADISLAV KULIKOV <sup>b</sup>, ELDAR GABIDULIN <sup>b</sup>, NATALYA KOVSHIK <sup>b</sup>, ALEXANDER GURIN <sup>b</sup>, SERGEI BORISOV <sup>b</sup>

ANALYSIS OF METHODS FOR MODIFYING ORGANIC BINDER

<sup>a</sup> Automobile and Road Institute «Donetsk National Technical University», <sup>b</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** One of the main tasks in the field of road construction materials science is the search for new materials that will improve the physical and mechanical properties of asphalt concrete and thereby increase the service life of non-rigid road clothes. An increase in the service life of road surfaces will lead to a decrease in the costs of their maintenance and repair. Numerous studies have established that improving the quality of asphalt concrete can be achieved by improving the physical and mechanical properties of the organic binder. The analysis of methods for modifying oil road bitumen is carried out. It has been established that

there are two effective methods for modifying an organic binder, technological and recipe. Prescription methods have been proven to be the most effective. The classification of modifying additives for oil road bitumen is given. It has been proven that one of the most effective ways of modifying organic binders is the introduction of surfactants into their composition.

**Key words:** asphalt concrete, additives, methods of modifying asphalt concrete, classification, bitumen.

**Губа Константин Романович** – ассистент кафедры общеинженерных дисциплин автомобильно-дорожного института ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: использование старого асфальтобетона для приготовления новых смесей; возможность модифицирования вяжущего.

**Куликов Владислав Николаевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Габидулин Эльдар Ниязович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Ковшик Наталья Анатольевна** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Гурин Александр Дмитриевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Борисов Сергей Григорьевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Губа Костянтин Романович** – асистент кафедри загальноінженерних дисциплін автомобільно-дорожного інституту ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: використання старого асфальтобетону для приготування нових сумішей; можливість модифікування в'язучого.

**Куликов Владислав Миколайович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Габідулін Ельдар Ніязовіч** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Ковшик Наталія Анатоліївна** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Гурин Олександр Дмитрович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Борисов Сергій Григорович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Guba Konstantin** – assistant; General Engineering Disciplines Department, Automobile and Road Institute «Donetsk National Technical University». Scientific interests: the use of old asphalt concrete for the preparation of new mixtures; the possibility of modifying the binder.

**Kulikov Vladislav** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Gabidulin Eldar** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Kovshik Natalya** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Gurin Alexander** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Borisov Sergei** – Master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

УДК 678.686

**Е. Э. САМОЙЛОВА, В. И. БРАТЧУН, Д. В. ГУЛЯК, А. Г. ДОЛЯ**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ МОДИФИКАЦИИ  
ДОРОЖНОГО БИТУМА ТЕРМОПОЛИМЕРОМ – «ЭЛВАЛОЙ АМ» В  
КОМПЛЕКСЕ С ПОЛИФОСФОРНОЙ КИСЛОТОЙ**

**Аннотация.** Данная статья посвящена изучению реакций компонентов битума с модификатором – термополимером «Элвалой АМ» и полифосфорной кислотой (ПФК) как мощного дегидратирующего и конденсирующего агента. Показано, что в результате этого повышается эффективность модификации дорожного битума Элвалоем АМ. Битум представляет сложную систему из масел, смол, асфальтенов, карбенов и карбонидов. Полициклические ароматические и нафтеновые структуры смол и асфальтенов содержат некоторое количество гетероциклов (S, N). Смолы включают асфальтогеновые и карбоновые кислоты и их ангидриды до 1 %. В небольших количествах содержатся карбонильные, сложноэфирные, гидроксильные и аминогруппы. «Элвалой АМ» – термополимер этиленглицидилакрилата, содержит 5 % эпоксидных групп (определено в хлороформенном растворе по ДСТУ 2093-92 «Смоли эпоксидно-діанові неотвержені»). Производитель (фирма Дюпон, США) не приводит характеристики термополимера. Исходя из названия и содержания эпоксидных групп, в статье представлен его структурный фрагмент и приведен метакрилатный фрагмент из соображений доступности глицидилметакрилата, который выпускается в промышленном масштабе.

**Ключевые слова:** битум, модификатор термополимер «Элвалой АМ», глицидилметакрилат, полифосфорная кислота, этерификация, конденсация, алкоголиз, полимеризация, дегидратация, эпоксидные группы, радикалы, битумполимерное вяжущее (БПВ).

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Нефтяные дорожные битумы по структуре представляют собой коллоидные системы, в которых высокомолекулярные компоненты асфальтены, поверхностноактивированные асфальтогеновыми кислотами и смолами, коллоидно диспергированы в смеси низкомолекулярных углеводородов [1]. Нефтяные дорожные битумы характеризуются низкой температурой размягчения и высокими температурами стеклования, недостаточной адгезией поверхности минеральных материалов и атмосферостойкостью. В настоящее время особого внимания заслуживают исследования асфальтобетон с использованием битумополимерного вяжущего (БПВ), в котором в качестве модифицирующего полимера использован реакционноспособный термопласт Элвалой АМ [2–3]. По данным производителя (американская фирма «DUPON») – это этиленглицидилакрилат (ЭГА), в котором этиленовая основа придает системе эластичность, а глицидилакрилатный фрагмент придает модифицированному органическому вяжущему полярность и обеспечивает устойчивость БПВ во времени в результате взаимодействия глицидиловой группы с компонентами битума [4]. Отмечены характерные для Элвалоа АМ (Е1) свойства: легкое растворение в битуме и взаимодействие эпоксидных групп этиленглицидилакрилата с асфальтогеновыми кислотами битума. Фирмой «DUPON» предложен процесс модификации битума Элвалоем АМ в присутствии полифосфорных кислот в качестве катализатора. Так как химическое взаимодействие в системе битум-Е1 протекает достаточно полно при температуре 200 °С, то эту температуру нельзя считать приемлемой для технологической переработки дорожных битумов [4].

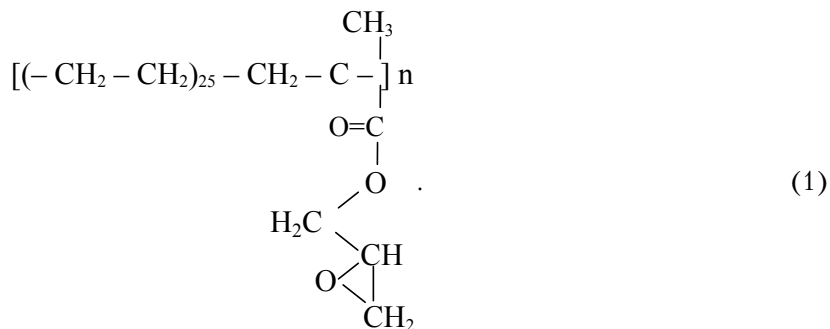
### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время недостаточно изучены химические процессы взаимодействия битума с Элвалоем в присутствии ПФК, а это эффективный способ снижения энергоёмкости производства БПВ и повышение степени структурированности битума при его модификации.

#### ЦЕЛЬ

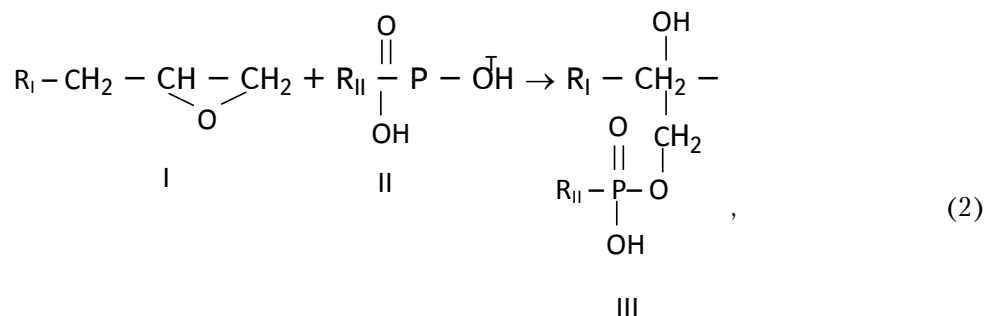
Изучить химические процессы в битуме, модифицированном «Элвалоем АМ» в присутствии полифосфорной кислоты.

Исходя из названия и содержания эпоксидных групп, структурный фрагмент Элвалоа может быть представлен следующим образом (1) [5–7]:

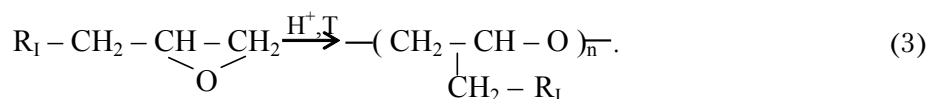


Молекулярная масса фрагмента  $M = 842$ .

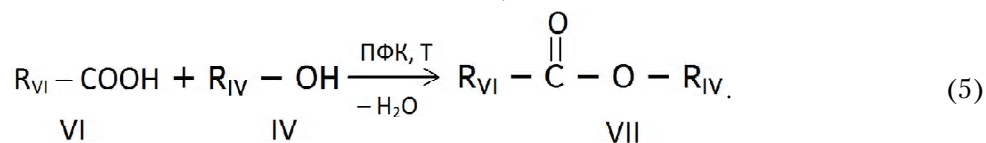
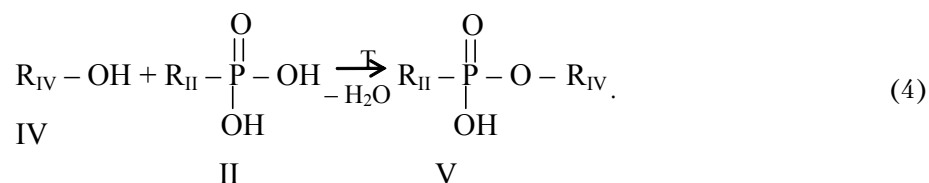
ПФК известны как мощные дегидратирующие и конденсирующие агенты. Тем более они будут раскрывать эпоксидные группы Элвалоа АМ (этот процесс легко протекает и с ортофосфорной кислотой) реакция конденсации (2):



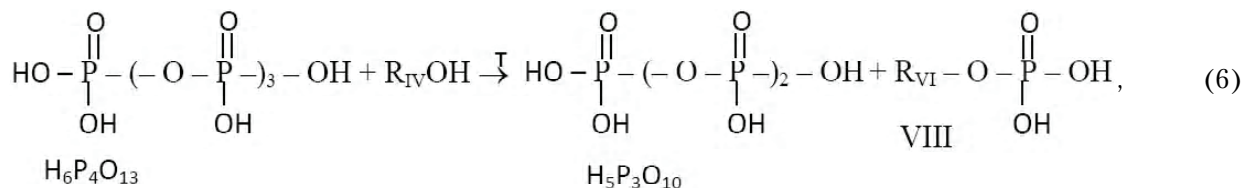
и катионной полимеризации (3):



Возможны реакции с карбоксилсодержащими группами битума: реакции этерификации гидроксил- и карбоксилсодержащих компонентов (4, 5):



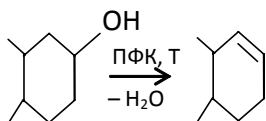
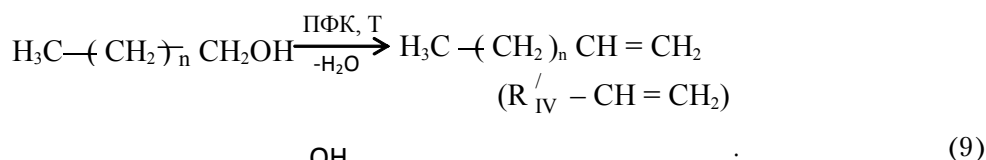
и алкоголиза (6, 7, 8):



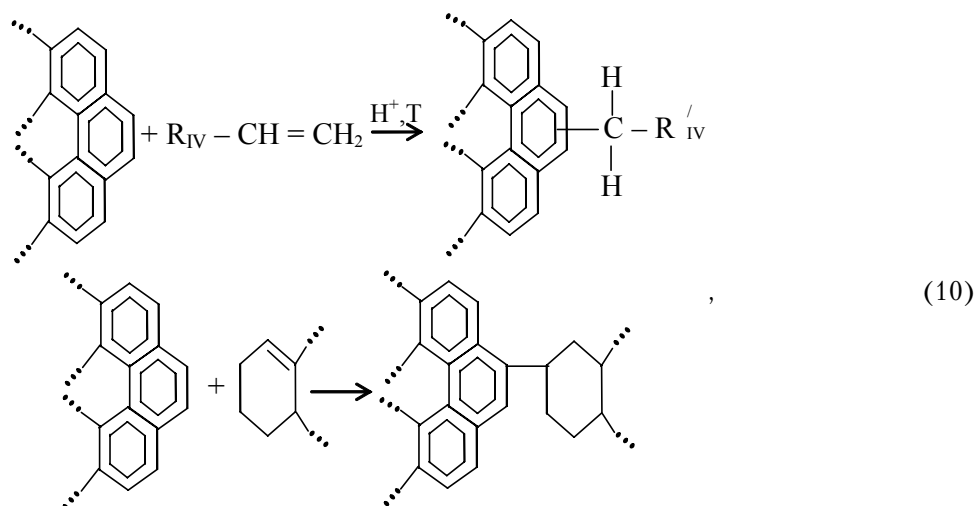
Аналогично разлагаются полифосфорные кислоты (по ангидридным группам) аминогруппами до ортофосфорной кислоты (реакция аминолиза). Процесс заканчивается реакцией (8).

Ангидридные группы ПФК реагируют с эпоксидными группами Элвалоя АМ (ЕI) в присутствии протодоноров (карбоксильные, гидроксильные и аминогруппы, влага, фосфорильные протоны). В свою очередь, последние разлагают ПФК (реакция 4) на остатки (VIII, VIII', VIII''), которые также конденсируются с ЕI по реакции (2).

Парафиновые и нафтеновые радикалы ( $\text{R}_{\text{IV}}$ ) со спиртовыми группами под действием ПФК дегидратируются (9):

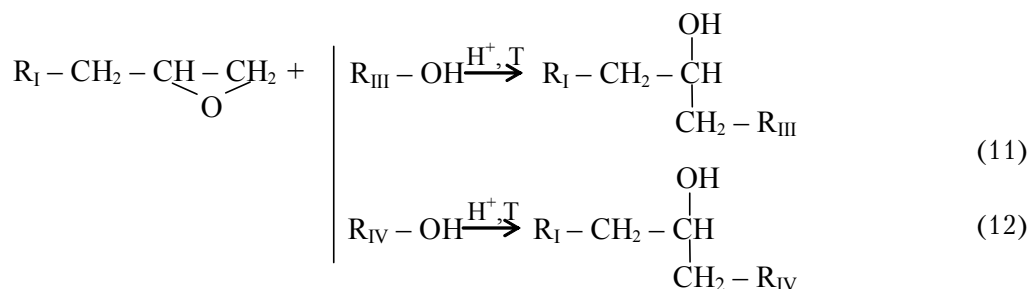


Образующиеся непредельные соединения алкилируют конденсированные ароматические структуры в асфальтенах, карбенах и карбоидах (10) [5-7].

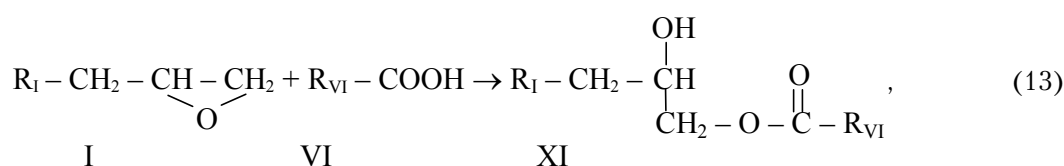


- $\text{R}_I$  – остаток Элвалоя АМ;
- $\text{R}_{\text{II}}$  – остаток полифосфорной кислоты;
- $\text{R}_{\text{IV}}$  – остаток гидроксилсодержащей структуры битума;
- $\text{R}_{\text{VI}}$  – остаток асфальтогеновых кислот.

При повышенных температурах реален процесс взаимодействия эпокси групп со спиртовыми гидроксильными группами (при катализе ПФК и  $H_3PO_4$ ) (11, 12):



Происходит также взаимодействие эпокси групп с асфальтогеновыми (карбоновыми) кислотами (13):



Здесь  $R_{III}$ ,  $R_{IV}$ ,  $R_{VI}$  – остатки продуктов III, IV, VI.

Действительно, битум взаимодействует как с ПФК, так и с Элвалоем АМ при 200 °C. Реакции (4) и (8) проверены на модельной системе «бензиловый спирт – ПФК-105 (0,2 %)». Тепловой эффект реакции при 165 °C 20,9 Дж/г бензинового спирта.

Реакция (2) проверена на модельной системе «бензиловый спирт – ЭД-20 (4...8 %) – ПФК-105 (0,2 %)»: теплота реакции раскрытия эпоксидных групп при 165 °C (без теплового эффекта реакции с гидроксильными группами бензинового спирта) 1 844 Дж/г эпоксидных групп (79,28 кДж/моль). Для сравнения: теплота полимеризации окиси этилена 94,5 кДж/моль [8].

Концентрации Элвалою АМ в битуме 2,5 % соответствует содержание 0,017 моль эпокси группы/кг битума; концентрации 0,2 % ПФК – соответствует 0,021 моль активных протонов /кг битума. За активные приняты протоны ПФК с константой диссоциации  $K(25\text{ }^\circ\text{C}) \geq 7,11 \cdot 10^{-3}$  (соответствует первой стадии диссоциации  $H_3PO_4$ ). Т. е. практически все активные протоны ПФК связываются с Элвалоем АМ.

При этом наибольший вклад в структурирование модифицированной системы вносят пирофосфорная и другие полифосфорные кислоты, содержащие два и более активных протона ( $n_{\text{акт.}} \geq 2$ ).

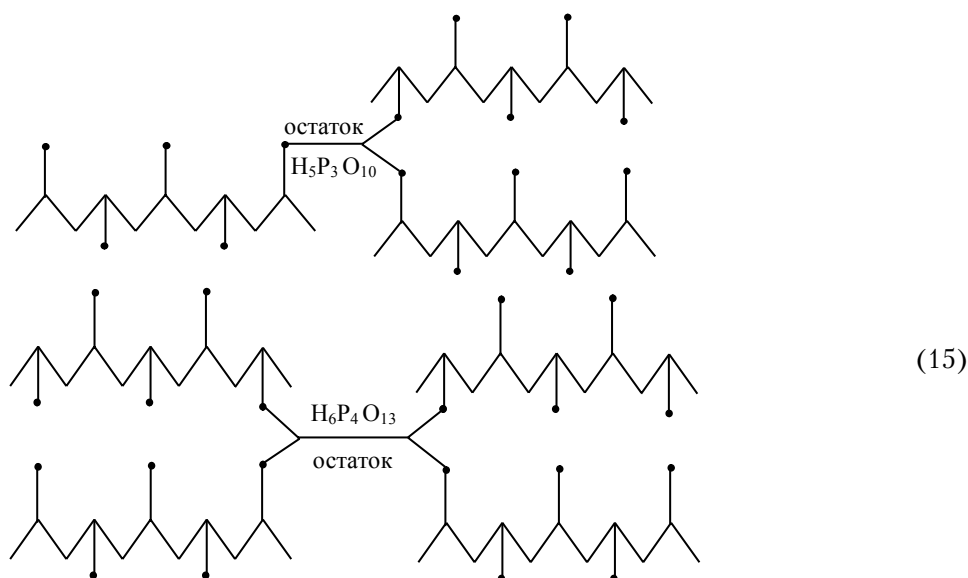
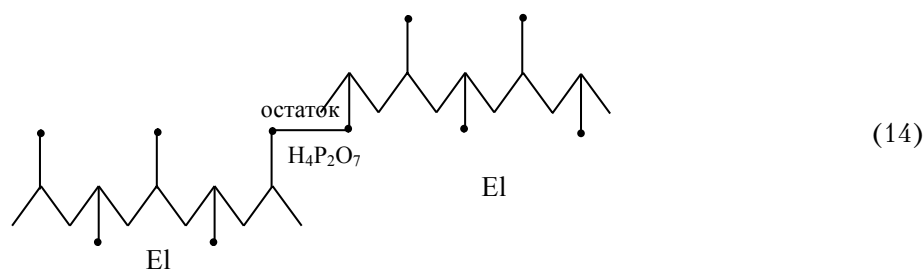
Принято, что молекула «Элвалой АМ» содержит 10 эпокси групп (1) и что половина из них прореагирует с о-фосфорной кислотой.

Тогда с собственно полифосфорными кислотами смогут прореагировать оставшиеся 5 эпокси групп каждой молекулы Элвалою АМ (El). Если представить, что с ПФК реагирует всего одна эпокси группа в каждой молекуле Элвалою АМ, то образуются сдвоенные цепи (с  $H_4P_2O_7$ ) и узлы (с ПФК  $n_{\text{акт.}} > 2$ ), соединяющие несколько цепей (формулы 14, 15).

В свою очередь, каждая из этих первичных структур может взаимодействовать с новыми молекулами ПФК ( $n_{\text{акт.}} \geq 2$ ) по эпокси группам, образуя постепенно усложняющуюся сетчатую структуру, которая и обеспечивает требуемый эффект модификации.

Поскольку в ПФК содержится некоторый избыток активных протонов по отношению к эпокси группам и в соответствии с вероятностным характером взаимодействий, сетчатые структуры могут связываться с реакционноспособными группами смол, прежде всего с гидроксильными и аминогруппами (через их взаимодействие с эпоксидными группами в присутствии протонов ПФК). Этот фактор, а также переплетение молекулярных цепей смол и сетчатой структуры обеспечат агрегативную устойчивость модифицированного битума. А комбинация сетчатой структуры и асфальтенов стабилизирует коллоидную структуру битума и придает ей более высокие эластические и прочностные свойства.

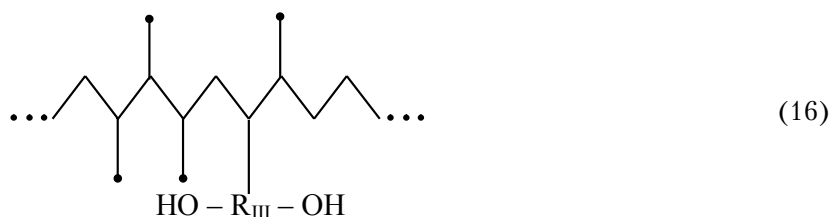




Стабилизации и структурированию системы полученного битумополимерного вяжущего (БПВ) способствуют реакции (9) и (10).

Совершенно очевидно, что наличие влаги в битуме будет крайне отрицательно отражаться на эффективности ПФК, поскольку под действием влаги ПФК превращается в о-фосфорную кислоту (по аналогии с реакцией 8). В этом случае исключаются реакции (9) и (10). А структурирование и образование полимерных цепей будет осуществляться за счет реакций (2) и (4) с о-фосфорной кислотой и реакции (3) под ее воздействием.

Представим схематически взаимодействие одной эпоксигруппы EI с молекулой о-фосфорной кислоты с образованием гидроксилсодержащего продукта реакции (16):



Тогда возможно связывание этой цепи с другой цепью Элвалоя АМ по реакции (11) через гидроксил или с асфальтогеновыми кислотами (АК) по реакции (13). Но возможны реакции связывания с другими гидроксилсодержащими цепями и АК по тем же реакциям через эпоксигруппы, которые в цепи III присутствуют наряду с гидроксильной.

### ВЫВОДЫ

Даже в присутствии влаги возможно образование в битумополимерном вяжущем (БПВ) полимерной сетки на основе цепей Элвалоя АМ и связанных со структурными элементами битума гидроксильных и карбоксильных групп (это относится и к аминогруппам).

Первоначально (в отсутствие влаги) сформированная сетка при эксплуатации БПВ также должна сохраниться, т. к. даже после перехода ПФК в о-фосфорную кислоту узел сохранится за счет неизбежных зацеплений элементов цепей, подвижность которых будет сильно ограничена связями, возникшими за счет вышерассмотренных реакций.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гунн, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гунн. – Москва : Химия, 1973. – 432 с. – Текст : непосредственный.
2. Полимерно-битумные вяжущие и асфальтобетоны на основе битумов, модифицированных Элвалоем / В. А. Золотарев, С. В. Ефремов, Я. И. Пыриг, С. А. Чугуенко. – Текст : непосредственный // Вестник Харьковского автомобильно-дорожного университета. – 2002. – Вып. 19. – С. 88–93.
3. Столярова, Л. Характеристики, рекомендації, відгуки о термопласте Элвалою АМ / Л. Столярова. – Киев : LAKET, 2002. – 78 с. – Текст : непосредственный.
4. Братчун, В. И. Оптимізація складу асфальтов'язущого речовини «Бітум-Елвалою АМ-шлам» нейтралізації травильних розчинів (ШН), активованний полімерсодержащим відходом виробництва епоксидних смол (ПОЭС) / В. И. Братчун, Е. Э. Самойлова, М. К. Пактер [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2006. – Выпуск 2006-5(61) Современные строительные конструкции и материалы. – С. 133–138.
5. Братчун, В. И. Модифікація дорожнього бітума реакціоспроможним термополімером з використанням каталізатора / В. И. Братчун, Е. Э. Самойлова, М. К. Пактер. – Текст : непосредственный // Современные проблемы строительства [Донецкий ПромстройНИИпроект]. – 2005. – С. 213–218.
6. Братчун, В. І. Дорожні асфальтобетони з комплексно-модифікованою мікроструктурою з використанням реакційно-здатного термопласту Елвалою АМ / В. І. Братчун, В. Л. Беспалов, О. М. Ставицький [та ін.]. – Текст : непосредственный // Автошляховик України. – 2007. – № 36. – С. 32–36.
7. Теоретико-експериментальні принципи отримання модифікованих дорожніх асфальтобетонів підвищеної довговічності : монографія / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, Е. А. Ромасюк. – Донецк : Изд-во ООО НПП «Фиолант», 2020. – 244 с. – Текст : непосредственный.
8. Топчиев, А. В. Реакція алкілювання органічних сполучень олефінами / А. В. Топчиев, С. В. Загородний, В. Т. Крючкова. – Москва : Изд. АН СССР, 1962. – 324 с. – Текст : непосредственный.

Получена 29.12.2020

#### О. Е. САМОЙЛОВА, В. І. БРАТЧУН, Д. В. ГУЛЯК, А. Г. ДОЛЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ В БІТУМІ ПРИ ЙОГО МОДИФІКАЦІЇ ТЕРМОПОЛІМЕРОМ «ЕЛВАЛОЕМ АМ» У КОМПЛЕКСІ З ПОЛІФОСФОРНОЮ КИСЛОТОЮ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Дана стаття присвячена вивченню реакцій компонентів бітуму з модифікатором термополімером «Елвалою АМ» і поліфосфорною кислотою (ПФК) як потужного дегідратуючого і конденсуючого агента. В результаті цих реакцій підвищується ефективність модифікації бітуму Елвалоем АМ з використанням поліфосфорної кислоти (ПФК). Бітум представляє складну систему з масел, смол, асфальгенів, карбенів і карбодів. Поліциклічні ароматичні і нафтеніві структури смол і асфальгенів містять деяку кількість гетероциклів (S, N). Смоли включають асфальтогенові і карбонові кислоти і їх ангідриди до 1 %. У невеликих кількостях містяться карбонільні, складноєфірні, гідроксильні і аміногрупи. «Елвалою АМ» – термополімер етиленгліцидилакрилату, містить 5 % епоксидних груп (визначено у хлороформному розчині за ДСТУ 2093-92 «Смоли епоксидно-діанові неотверджені»). Виробник (фірма Дюпон, США) не наводить характеристики термополімеру. Виходячи з назви і змісту епоксидних груп, у статті представлено його структурний фрагмент і наведено метакрилатний фрагмент з міркувань доступності гліцидилметакрилату, який випускається в промислового масштабі.

**Ключові слова:** бітум, модифікатор термополімер «Елвалою АМ», гліцидилметакрилат, поліфосфорна кислота, етерифікація, конденсація, алкохолізація, полімеризація, дегідратація, епоксидні групи, радикали, бітумполімерне в'язуче (БПВ).

HELEN SAMOJLOVA, VALERY BRATCHUN, DENIS GULYAK, ANATOLIY DOLYA  
THE LIKELY CHEMICAL PROCESSES IN THE BITUMEN WITH ITS  
MODIFICATIONS BY «ELVALOY AM» IN THE PRESENCE  
POLYPHOSPHOROUS ACID

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** This article is devoted to the study of the reactions of bitumen components with the modifier terpolymer «Elvaloy AM» and polyphosphoric acid (PFC) as a powerful dehydrating and condensing agent. As a result of these reactions, the efficiency of modifying bitumen with Elvaloy AM using polyphosphoric acid (PFC) increases. Bitumen is a complex system of oils, resins, asphaltenes, carbones and carbides. Polycyclic aromatic and naphthenic structures of resins and asphaltenes contain a certain number of heterocycles (S, N). Resins include asphaltic and carboxylic acids and their anhydrides up to 1 %. Small amounts contain carbonyl, ester, hydroxyl and amino groups. «Elvaloy AM» – terpolymer of ethylene glycidylacrylate, contains 5 % of epoxy groups (determined in chloroform solution according to DSTU 2093-92 «Epoxy-dianovi neotverzeni resins»). The manufacturer (Dupont, USA) does not give the characteristics of the terpolymer. Based on the name and content of the epoxy groups, he article presents a structural fragment of «Elvaloy AM» and a methacrylate fragment due to the availability of glycidyl methacrylate, which is produced on an industrial scale.

**Key words:** bitumen, modifier terpolymer «Elvaloy AM», glycidyl methacrylate, polyphosphoric acid, esterification, condensation, alcoholization, polymerization, dehydration, epoxy groups, radicals, bituminous polymer binder (BPB).

**Самойлова Елена Эдуардовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной химии; кафедры техно-сферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химические исследования полимерных композиционных материалов; управление техносферной безопасностью.

**Братчун Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химическая механика технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев жестких дорожных одежд на основе модифицированных органических вяжущих и комплексного модифицирования структуры бетонов; разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Гуляк Денис Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев жестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Доля Анатолий Григорьевич** – кандидат технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: использование техногенного сырья в дорожном строительстве.

**Самойлова Олена Едуардівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної хімії; кафедри техносферної безпеки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічні дослідження полімерних композиційних матеріалів.

**Братчун Валерій Іванович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізико-хімічна механіка технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікованих органічних в'язучих і комплексного модифікування структури бетонів; розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Гуляк Денис Вячеславович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорсткого дорожнього одягу на основі модифікування органічних в'язучих.

**Доля Анатолій Григорович** – кандидат технічних наук, професор кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: використання техногенної сировини в дорожньому будівництві.

**Samojlova Helen** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Applied Chemistry Department; Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physico-chemical studies of polymer composite materials.

**Bratchun Valery** – D. Sc. (Engineering), Professor; Head of the Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: physical and chemical mechanics of technological and lasting road concretes for building of structural layers of non-rigid road coats on the basis of modification of organic astringent and complex microstructure modification of concretes; elaboration of effective technologies of processing of technogenous raw material in to the components of compositional materials.

**Gulyak Denis** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: receipts of technological and lasting travelling concretes for building of structural layers of non-rigid travelling clothes on the basis of retrofitting of organic astringent.

**Dolya Anatoliy** – Ph. D. (Eng.), Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: application of processed raw materials in road building.

УДК 665.855.3

**А. В. ЗАГОРОДНЯЯ**

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ БИТУМОПОЛИМЕРНЫХ  
ВЯЖУЩИХ ПРИ ХРАНЕНИИ**

**Аннотация.** Приведены результаты исследования стабильности при технологическом хранении битумополимерных вяжущих на основе дивинил-стирольного сополимера и этиленглицидметакрилата. Установлено, что увеличение содержания полимера приводит к потере стабильности битумополимерного вяжущего, при этом существует концентрация полимера, до которой модифицированные битумы сохраняют относительно высокую стабильность, что обусловлено механизмами их агрегативной и седиментационной устойчивости. Полученные данные подтверждают существование зависимости между стабильностью полимерно-битумного вяжущего и маркой, а следовательно, и консистенцией исходного битума. Доказано, что наиболее высокой стабильностью обладают полимерно-битумные вяжущие, модифицированные 2 % Элвалой АМ и 3 % ДСТ 30-01, структурированный 30 % технической серы. Стабильность БМП зависит от консистенции исходного битума и снижается с применением битумов меньшей пенетрации (и большей температуры размягчения). Введение полимера приводит к увеличению вязкости БМП в области технологических температур, тем большому, чем выше концентрация полимера и выше консистенция битума.

**Ключевые слова:** битумополимерное вяжущее, стабильность, пенетрация, температура размягчения, эластичность.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Отдельной проблемой технологии производства и применения битумов, модифицированных полимерами, является потеря ими стабильности при длительном хранении при технологических температурах. Это обусловлено разной плотностью битумов и полимеров, различными значениями параметров их растворимости, высокой концентрацией полимера, а также высокой избирательной растворимостью полимеров в углеводородной среде (маслах) битумов. Степень расслоения системы битум-полимер зависит от молекулярной массы, состава полимера, степени его дисперсности, вязкости и состава битума. Эти обстоятельства довольно сильно затрудняют работу с битумополимерными вяжущими (ПБВ), ставя задачу организации возможно меньшего временного промежутка между производством ПБВ и его использованием при приготовлении асфальтобетонной смеси [1, 5, 6].

**Целью работы** является оценка стабильности битумополимерного вяжущего в зависимости от вида и количества используемого для модификации полимера в процессе хранения при высоких технологических температурах.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве объектов исследования приняты дорожные битумы БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, отвечающие требованиям (ГОСТ 22245-90). В качестве полимерных модификаторов битума использованы дивинил-стирольный блок-сополимер ДСТ 30-01 (ТУ 38.103267-99) в концентрации 1,5, 3,0, 5,0 %; термополимерэтиленглицидиакрилат концентрацией 2 %, отвечающий требованиям сертификата качества концерна производителя «DUPON» (США); техническая сера (ГОСТ127.1-93) концентрацией 30 %. Модификация осуществлялась в лабораторной мешалке при скорости вращения 300 об/мин, температуре 170 °С в течение 1,0–1,5 ч.

Испытание на стабильность включает в себя оценку разницы значений пенетрации, температуры размягчения и эластичности вяжущего в нижнем и верхнем слоях сосуда после прогрева при температуре  $(180 \pm 5)$  °С, по отношению к среднему значению этих показателей, выраженную в процентах. Термостатированию подвергаются тубы высотой около 120 мм и диаметром 40...50 мм, заполненные по специальной методике вяжущим [2]. Термостатирование испытуемых образцов осуществляется в течение 24 часов, так как практически 90 % изменений свойств БМП приходится на первые 24 часа их термостатирования.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В процессе расслоения формируются две системы, которые резко отличаются друг от друга. В верхней части сосуда формируется система, которая представлена преимущественно маслами как дисперсионной средой и полимером как дисперсной фазой. Для этой системы характерна большая пенетрация, очень высокая температура размягчения и большая эластичность. В нижней части сосуда сосредотачивается смолисто-асфальтеновая система, которая обеднена маслами. Для такой системы характерны: повышенная вязкость при температуре окружающей среды; меньшая, чем для исходного битумополимерного вяжущего (вследствие малого содержания полимера), и большая, чем для исходного битума, температура размягчения (вследствие большего содержания асфальтенов и меньшего содержания масел) [3]. В то же время эта система может иметь заметную эластичность, которая проявляется в битумополимерной системе даже при малом содержании термоэластопласта ДСТ-30.

Для оценки степени расслоения тубу с вяжущим разрезали на две равные части и для вяжущего, находящегося в каждой части, определяли комплекс стандартных показателей. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 данные свидетельствуют о том, что наибольшую устойчивость против расслоения модифицированных вяжущих обеспечивает терполимер Элвалой АМ. При содержании 2 % этого полимера, отклонение показателей вяжущего из верхнего и нижнего слоев в среднем составляет: для пенетрации – 28 %, температуры размягчения – 4 %, эластичности – 10 % (рисунок). Вяжущее, модифицированное 2 % этиленглицидилметакрилата значительно термостабильнее, чем битумополимерное вяжущее, содержащее 3% дивинил-стирольного сополимера, за счет близкого сродства полимера с битумом и повышенной степени дисперсности (табл. 2).

Устойчивость против расслаивания повышается если битумополимерную композицию структурировать технической серой. По мере увеличения концентрации элементарной серы произойдет увеличение общей структурированности системы в результате того, что незначительная часть серы примет участие в вулканизации дивинил-стирольного сополимера. Часть серы растворится (20...26 % мас). Остальная сера диспергируется в битуме до коллоидного уровня. Именно на поверхности этой серы большая часть растворенного дивинил-стирольного сополимера перейдет в структурированное состояние. Это приведет к усилению коагуляционного структурообразования в битумополимерсерном вяжущем. Разница между показателями физико-механических свойств в системах «БНД 60/90+3,0 % ДСТ-30-01» и «БНД 60/90+3,0 % ДСТ-30-01+ 30% техн. серы» составит: по пенетрации – 46 %; температуре размягчения – 11 %; эластичности – 32 % (рисунок).

Значения показателей неоднозначно реагируют на потерю стабильности системой БМП. Значения пенетрации с увеличением расслоения растут для верхней части образца и снижаются для нижней. Это объясняется тем, что структура битума в нижней трети образца подобна высоковязкому битуму с меньшим значением пенетрации, чем у исходного битума. В верхней части образца полимерная «сетка», насыщенная мальтеновой фракцией, мало сопротивляется прониканию иглы пенетromетра [4]. В этом случае решающее значение имеет содержание битумных масел, определяющее жёсткость системы.

При оценке стабильности битумополимера по температуре размягчения характерно, что повышенное содержание полимера в верхней части образца характеризуется закономерно высоким значением температуры размягчения при повышении пенетрации. Кроме этого, для концентрации 5 % полимера показатель расслоения по температуре размягчения отличается незначительно, в то время как данные эластичности и пенетрации показывают различное расслоение для дивинил-стирольного сополимера.

Эластичность является показателем, наиболее явно свидетельствующим о наличии полимера, и следствием формирования в вяжущем вначале сопряженной асфальтено-полимерной сетки, а затем, при повышенном содержании полимера, матричной полимерной сетки, характерной для структур, в которых средой является полимер, а фазой битум.

**Таблица 1** – Изменение показателей физико-механических свойств БМП в зависимости от продолжительности прогрева

Наименование вяжущего	Продолжительность прогрева	Верх			Низ		
		Глубина проникания иглы, при 25 °С, 0,1 мм	Температура размягчения по КиШ, °С	Эластичность, при 25 °С, %	Глубина проникания иглы, при 25 °С, 0,1 мм	Температура размягчения по КиШ, °С	Эластичность, при 25 °С, %
БНД 60/90	0	68	49	–	68	49	–
	4	59	48	34,1	56	48	39,8
	8	61	49	35,4	52	49	33,6
	24	47	52	40,7	45	51	39,5
БНД 60/90+1,5 % ДСТ-30-01	0	49	57	62	49	57	62
	4	48	55	63,5	47	55	55,5
	8	62	55	60,6	53	57	54,6
	24	45	58	70	35	59	74,8
БНД 60/90+3,0 % ДСТ-30-01	0	45	59	82	45	59	82
	4	41	62	86	39	56	81
	8	35	63	84	36	58	73
	24	65	77	88	22	49	48
БНД 60/90+3,0 % ДСТ-30-01+30% техн. серы	0	46	60	84	46	60	84
	4	46	69	86	59	58	81
	8	53	67	87	43	57	74
	24	67	75	87	44	53	73
БНД 60/90+5,0 % ДСТ-30-01	0	35	71	89	35	71	89
	4	32	76	93	29	64	81
	8	24	81	91	28	66	72
	24	54	95	95	12	57	45
БНД 60/90+2 % Элвалой АМ	0	50	56	75	50	56	75
	4	49	54	76,5	48	54	68,5
	8	64	54	83,6	51	58	67,6
	24	47	59	89	33	61	96,8

**Таблица 2** – Термоустойчивость битумополимерных вяжущих

Наименование полимера (массовая концентрация полимера, % к битуму)	Непредельность (1), %	Параметр растворимости полимера $\delta$ , $\frac{\text{МДж}^{0,5}}{\text{м}^{1,5}}$	Изменение показателей ( $\Delta A$ ) (2)		
			Пенетрация $P_{25}$ (0,1 мм)	Температура размягчения, °С	Эластичность при 25 °С, %
Элвалой АМ (3)	отсут.	17,4	7,0	–1,0	–6,0
ДСТ-30-01 (4)	7,43	17,8	53,0	40,1	52,0

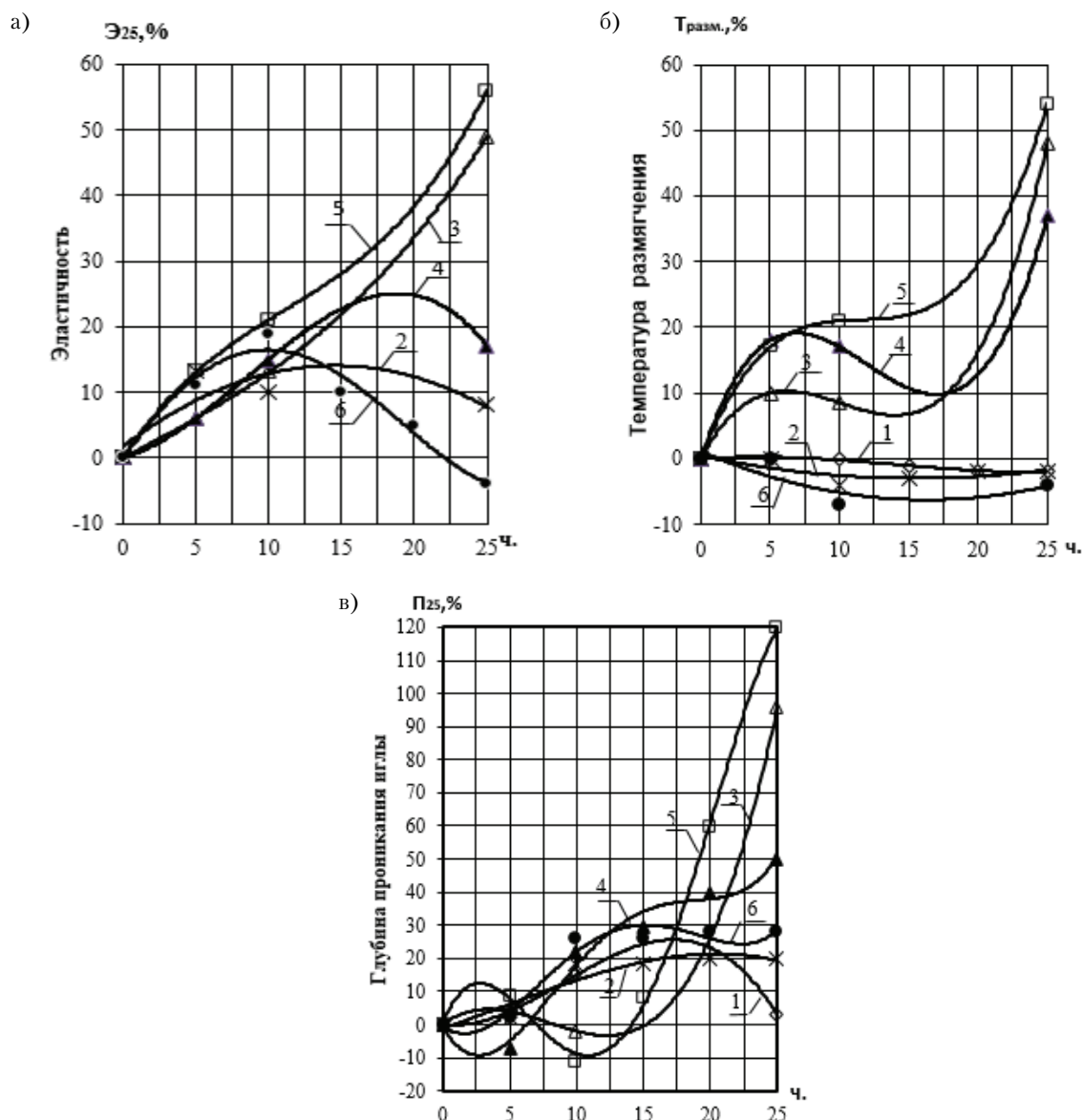
(1) содержание ненасыщенных связей ( $-\text{CH} = \text{CH}-$ );

(2)  $\Delta A = A_{\text{верх}} - A_{\text{низ}}$ , где  $A$  – абсолютные величины показателей качества модифицированного органического вяжущего сверху и снизу тюба;

(3) этиленглицидилметакрилат (ЭГМА);

(4) стирол-бутадиен-стирол (СБС).

Эластичность чистого битума БНД 60/90 не превышает 10...15 %. Введение 1,5 % ДСТ 30-01 повышает эластичность битумополимерного вяжущего до 50...60 %. При содержании дивинил-стирола в битуме, равном 3 %, эластичность вяжущего увеличивается до 80...90 % (рисунок).



**Рисунок** – Изменение эластичности (а) температуры размягчения (б), глубины проникания иглы (в) вяжущих при хранении: 1 – битум; 2 – битум + 1,5 % ДСТ-30-01; 3 – битум + 3,0 % ДСТ-30-01; 4 – битум + 3,0% ДСТ-30-01+ 30 % техн. серы; 5 – битум + 5,0 % ДСТ-30-01; 6 – битум + 2,0 % Элвалой.

Повышение содержания полимера приводит к увеличению расслоения системы. Если БМП с 1,5 % ДСТ 30-01 практически не расслаивается, то расслаиваемость БМП с 5 % этого полимера составляет: по пенетрации 120 %; по температуре размягчения 54 %; по эластичности 56 %. Это объясняется большей адсорбцией масел из битума и образованием полимерно-масляной системы в верхней части сосуда.

Устойчивость против расслаивания растет при использовании в качестве матрицы вяжущего с большим содержанием масел и малым содержанием асфальтенов. Как правило, это соответствует вяжущим с низкой вязкостью или большой пенетрацией. Подтверждением этому служат данные таблице 3, которые относятся к битумополимерам на основе битумов БНД 90/130, БНД 60/90 и БНД 40/60. Наиболее устойчиво против расслаивания вяжущее на основе БНД 90/130 и 3 % ДСТ 30-01. В таком случае большой объем низкомолекулярных углеводородов обеспечивает равномерное распределение полимера в дисперсионной среде, а малое содержание асфальтенов снижает вероятность процесса седиментации.

Согласно полученным данным БМП теряет стабильность при превышении определённой концентрации полимера. Так для от 1,5 до 3,0 % ДСТ 30-01 расслоение остаётся на относительно низком



**Таблица 3** – Влияние вязкости исходного битума на расслаиваемость БМП с 3 % ДСТ-30

Исходный битум	Пенетрация при 25 °С, 1/10 мм		Температура размягчения, °С		Эластичность при 25 °С, %	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
БНД 90/130	91	68	82	71	99	85
БНД 60/90	65	22	77	49	88	48
БНД 40/60	63	17	72	41	84	39

уровне, в то же время при превышении концентрации от 3 и 5 % некоторые показатели возрастают в 40–50 раз. Наблюдаемый эффект возможен при совместном возрастании разницы плотности фазы и среды, энергии поверхностного натяжения на границе раздела фаз и числа соударений частиц фазы за счёт увеличения объёма полимерной фазы БМП. Наибольшей стабильностью при выбранной концентрации обладают ДСТ 30-01, структурированный технической серой, и Элвалой АМ. Показатель расслоения в этих двух случаях не превышает 30 %.

### ВЫВОДЫ

1. Увеличение содержания полимера приводит к потере стабильности БМП, при этом существует концентрация полимера до которой БМП сохраняет относительно высокую стабильность, что обусловлено механизмами агрегативной и седиментационной устойчивости БМП.

2. Наиболее высокой стабильностью обладают БМП, модифицированные 2 % Элвалой АМ и 3 % ДСТ 30-01, структурированный 30 % технической серы.

3. Стабильность БМП зависит от консистенции исходного битума и снижается с применением битумов меньшей пенетрации (и большей температуры размягчения).

4. Введение полимера приводит к увеличению вязкости БМП в области технологических температур, тем большому, чем выше концентрация полимера и выше консистенция битума.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве : монография / под общей редакцией В. А. Золотарёва, В. И. Братчуна ; Всемирная дорожная ассоциация. Технический комитет «Нежесткие дороги» (С8) ; [перевод с французского В. А. Золотарёва, Л. А. Беспаловой]. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2003. – 299 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ Р 52056-2003. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол ТУ = Polymer-bitumen binders for roads on the basis of block copolymers of styrene-butadiene-styrene type. Specifications : государственный стандарт Российской Федерации : принят и введен в действие постановлением Госстандарта России от 23 мая 2003 г. № 157-ст. : введен впервые : дата введения 2004-01-01 / разработан Федеральным Государственным унитарным предприятием «Государственный дорожный научно-исследовательский институт» (ФГУП «Союздорнии»). – Москва : Стандартинформ, 2004. – 8 с.
3. Физико-химическая механика строительных материалов : учебник для студентов высших учебных заведений / В. И. Братчун, В. О. Золотарев, М. К. Пактер, В. Л. Беспалов ; под редакцией В. И. Братчуна. – Донецк : Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2013. – 338 с. – Текст : непосредственный.
4. Галкин А. В. Стабильность битумополимеров при технологическом хранении / А. В. Галкин. – Текст : непосредственный // Вестник ХНАДУ. – 2005. – № 30. – С. 183–186.
5. Золотарёв, В. А. Битумы, модифицированные полимерами и добавками / В. А. Золотарёв. – Текст : непосредственный // Избранные труды ; в 3 томах, том 2. – Санкт-Петербург : Славутич, 2013. – 152 с.
6. Гохман, Л. М. Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС : учебное пособие / Л. М. Гохман. – Москва : ЗАО «ЭКОНИНФОРМ», 2004. – 584 с. – Текст : непосредственный.

Получена 30.12.2020

А. В. ЗАГОРОДНЯ

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ БІТУМОПОЛІМЕРНИХ  
В'ЯЖУЧИХ ПРИ ЗБЕРІГАННІ

ДОУ ВО ЛНР «Луганський державний університет імені Володимира Даля»

**Анотація.** Наведено результати дослідження стабільності при технологічному зберіганні бітумополимерних в'язучих на основі дивініл-стирольного співполімеру і етиленгліцидилметакрилату.

Встановлено, що збільшення вмісту полімеру призводить до втрати стабільності бітумополімерного в'язучого, при цьому існує концентрація полімеру, до якої модифіковані бітуми зберігають відносно високу стабільність, що обумовлено механізмами їх агрегативної і седиментаційної стійкості. Отримані дані підтверджують існування залежності між стабільністю полімерно-бітумного в'язучого і маркою, а отже, і консистентністю вихідного бітуму. Доведено, що найбільш високу стабільність мають полімерно-бітумні в'язучі, модифіковані 2 % Елвалой АМ і 3 % ДСТ 30-01, структурованого 30 % технічної сірки. Стабільність БМП залежить від консистентності вихідного бітуму і знижується із застосуванням бітумів меншої пенетрації (і більшої температури розм'якшення). Введення полімеру призводить до збільшення в'язкості БМП в зоні технологічних температур, тим більшого, чим вище концентрація полімеру і вище консистентність бітуму

**Ключові слова:** бітумополімерне в'язуче, стабільність, пенетрація, температура розм'якшення, еластичність.

ANASTASIA ZAGORODNYAYA  
ON COMPLEX MODIFICATION OF ASPHALT CONCRETE  
MICROSTRUCTURE BY DIVINYLS-STYRENE THERMOELASTOPLASTIC  
SEI HE LPR «Lugansk State University named after Volodymyr Dahl»

**Abstract.** Results of study of stability in process storage of bitumen-polymer binders based on divinyl-styrene copolymer and ethylene glycidyl methacrylate are given. It has been found that an increase in polymer content leads to a loss of stability of the bitumen-polymer binder, while there is a concentration of polymer to which the modified bitumen retains relatively high stability, due to the mechanisms of their aggregative and sedimentation stability. The data obtained confirm the existence of a relationship between the stability of the polymer-bitumen binder and the brand, and therefore the consistency, of the initial bitumen. Polymer-bitumen binders modified with 2% Elvala AM and 3% DST 30-01, structured with 30% technical sulfur, have proved to be the highest stability. The stability of BMP depends on the consistency of the original bitumen and decreases with the use of bitumen of lower penetration (and a higher softening temperature). The introduction of the polymer leads to an increase in the viscosity of BMP in the range of technological temperatures, the greater, the higher the polymer concentration and the higher the consistency of bitumen.

**Key words:** bitumen-polymer binder, stability, penetration, softening point, elasticity

**Загородня Анастасія Вікторівна** – асистент кафедри строительных конструкций ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». Научные интересы: разработка теоретических положений о закономерностях формирования структуры и физико-механических свойств дорожного асфальтополимерсеробетона повышенной долговечности.

**Загородня Анастасія Вікторівна** – асистент кафедри будівельних конструкцій ДООУ ВО ЛНР «Луганський державний університет імені Володимира Даля». Наукові інтереси: розробка теоретичних положень про закономірності формування структури і фізико-механічних властивостей дорожнього асфальтополімерсіркобетону підвищеної довговічності.

**Zagorodnyaya Anastasia** – assistant, Building Structures Department, SEI HE LPR «Lugansk State University named after Volodymyr Dahl». Scientific interests: development of theoretical provisions on regularities of the formation of structure and physico-mechanical properties concrete road asphalt and polymeric sulfur concretes increased durability.

УДК 666.9.017

**Е. В. ЕГОРОВА, Е. Т. БОРОДАЙ, К. А. КОРЧАГИНА, М. Н. ВОДОЛАД, М. Э. ВОРОНЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДОНБАССА**

**Аннотация.** В работе исследовано влияние комплексной добавки, состоящей из модификатора вязкости и суперпластификатора на реологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механические свойства таких бетонов. В качестве минерального наполнителя применяли золошлаковую смесь Зуевской ТЭС. Все изученные составы бетонных смесей имеют довольно высокие значения подвижности. Установлено, что использование в качестве минерального наполнителя золошлаковой смеси и введение комплексной добавки в состав самоуплотняющихся бетонов увеличивает прочностные характеристики как в ранние, так и в более поздние сроки твердения. Следовательно, не отмечено несовместимости использованного модификатора вязкости и суперпластификатора и их совместного отрицательного влияния на изученные свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов. Можно рекомендовать применять самоуплотняющиеся бетонные смеси изученных составов для изготовления неармированных или малоармированных бетонных конструкций.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, подвижность, прочность, модификатор вязкости, суперпластификатор.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

При строительстве современных зданий и сооружений в последнее время все шире применяются высокотехнологичные бетонные смеси, способные без применения какого-либо внешнего механического воздействия заполнять опалубку (форму), в том числе густоармированную и со сложной геометрией, сохраняя при этом связность, однородность и нормативную плотность – самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). Наряду с высокой удобоукладываемостью такие бетоны характеризуются быстрыми темпами набора прочности, высокими физико-механическими характеристиками, что позволяет отнести их к классу «высокофункциональных бетонов» (High Performance Concretes). Это обеспечивается за счет применения комплексов модификаторов, включающих, как правило, эффективные разжижители, модификаторы вязкости, активные минеральные добавки (наполнители), ускорители твердения. При этом применение таких добавок, как поликарбоксилатные суперпластификаторы, микрокремнезем, метакаолин и др., приводит к значительному удорожанию самоуплотняющихся бетонов в сравнении с обычными. Кроме того, особенности состава и структуры самоуплотняющихся бетонов обуславливают возможность проявления и ряда недостатков: повышенные усадка и ползучесть, пониженный модуль упругости, опасность термического трещинообразования в массивных конструкциях, снижение морозостойкости. В связи с этим использование в составах таких бетонов отходов промышленности Донбасса обеспечит получение бетонных смесей и бетонов с нормируемыми показателями качества и невысокой себестоимостью.

Решающую роль в развитие технологии высокоподвижных бетонных смесей сыграли сформированные в результате многочисленных исследований и подтвержденные практикой научные основы модифицирования бетонов полифункциональными добавками-модификаторами [1, 2]. Оптимальное сочетание добавок-модификаторов, а при необходимости совмещение с ними других органических и минеральных материалов, позволяет направленно управлять реологическими свойствами бетонных смесей, модифицировать структуру цементного камня на микроуровне так, чтобы придать свойства, обеспечивающие высокую эксплуатационную надежность бетонных конструкций [3, 4].

© Е. В. Егорова, Е. Т. Бородай, К. А. Корчагина, М. Н. Водолад, М. Э. Вороненко, 2021

Создание самоуплотняющегося бетона прежде всего связано с разработкой японскими учеными [5, 6] и внедрением в практику нового поколения суперпластификаторов на основе полиакрилатов и поликарбоксилатов.

Основные компоненты самоуплотняющегося бетона те же, что используются при производстве обычного бетона. Отличие лишь в их соотношении, а также в использовании специальных добавок, которые, собственно, и придают бетону способность к самоуплотнению. В то же время для достижения высоких технологических и эксплуатационных характеристик самоуплотняющихся бетонов предъявляются более жесткие требования к производственным материалам.

Прочность самоуплотняющегося бетона обеспечивается каркасом заполнителей, склеенных цементной пастой в затвердевшем состоянии, в то время как технологические свойства смесей обеспечиваются цементной пастой в свежеприготовленном состоянии.

Таким образом, самоуплотняющиеся бетоны обладают комплексом свойств, позволяющим отнести их к высокофункциональным бетонам и рассматривать как инновационный материал в современном строительстве. В Японии около 50 % новых железобетонных конструкций изготавливается из СУБ, в Европе на их долю приходится 7...10 % объема производимого бетона. В значительно меньшей мере получили распространение эти бетоны в странах СНГ, хотя и здесь имеются примеры успешной их реализации, в частности в России построены такие уникальные сооружения, как: монолитный ростверк пилона М-7 Русского моста во Владивостоке; фундамент под высотный многофункциональный комплекс «Лахта-центр»; опытные блоки Саяно-Шушенской и Бурейской ГЭС; здание реактора ЛАЭС-2; кольцевые коридоры реактора НВАЭС и др. [7].

Отмечен положительный опыт применения самоуплотняющихся бетонов в дорожном строительстве, которые обеспечивают улучшение качества дорожного полотна, повышение скорости строительства, снижение энергопотребления и трудоемкости процесса, а также соответствуют основным принципам «устойчивого строительства» [8].

**Целью** настоящей работы является исследование влияния комплексной добавки, состоящей из модификатора вязкости и суперпластификатора на реологические и физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для определения влияния комплексной добавки на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов были приготовлены составы с использованием в качестве минерального наполнителя золошлаковой смеси Зуевской ТЭС.

Бетоны с модификаторами вязкости, по сравнению с бетонами порошкового типа, требуют большего расхода суперпластификаторов, более высокого значения В/В отношения для обеспечения требований по заполняющей (проникающей) способности. Возможны проблемы несовместимости модификаторов вязкости с суперпластификаторами.

Viscofluid SCC/10 используется в бетонных смесях для увеличения вязкости смеси, увеличивая ее стабильность, однородность, сопротивление сегрегации и водоотделению. Sika ViscoCrete 5-600 NP L обладает высоким пластифицирующим, диспергирующим и водоредуцирующим эффектом благодаря комплексному эффекту: поверхностной адсорбции и межмолекулярного «стерического» отталкивания.

В качестве компонентов самоуплотняющихся бетонных смесей приняты:

- портландцемент (ПЦ) ПЦ I-500 ООО «Донцемент» ( $S_{уд.} = 357 \text{ см}^2/\text{кг}$ ; НГ = 26,2 %,  $R_{28} = 51,5 \text{ МПа}$ );
- песок кварцевый (ПК) Ясиноватского карьера с  $M_k = 1,1$  (содержание ПИГ = 3 %, насыпная плотность =  $1\,207 \text{ кг}/\text{м}^3$ );
- щебень (Щ) гранитный Кальчикского карьера фракции 5...10 мм (насыпная плотность =  $1\,370 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; пустотность 44,5 %);
- минеральная добавка: золошлаковая смесь (ЗШС) Зуевской ТЭС (тонкость помола (остаток на сите № 008) = 4,75 %; насыпная плотность =  $881 \text{ кг}/\text{м}^3$ );
- модификатор вязкости (МВ) Viscofluid SCC/10;
- суперпластификатор (СП) Sika ViscoCrete 5-600 NP L.

Составы бетонных смесей (на  $1 \text{ м}^3$ ) приведены в таблице 1.

Показателями технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей служат такие характеристики, как подвижность (текучесть), выражаемая диаметром расплыва стандартного конуса (Flow spread S, мм) и временем растекания бетонной смеси конуса до достижения диаметра 500 мм (Slump

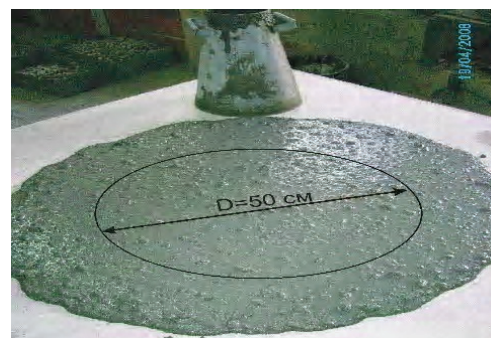
**Таблица 1** – Составы самоуплотняющихся бетонных смесей

№ состава	Компоненты бетонных смесей, кг						
	Ц	ЗПС	Щ	П	В	МВ	СП
1	442	–	885	796	287	–	1 % m <sub>B</sub>
2	442	–	885	796	287	1 % m <sub>B</sub>	1 % m <sub>B</sub>
3	287	155	885	796	287	–	1 % m <sub>B</sub>
4	287	155	885	796	287	1 % m <sub>B</sub>	1 % m <sub>B</sub>

flow time, T500, с) (рисунки 1, 2). При определении показателей подвижности смесей использовали мини-конус с размерами: диаметр нижнего основания 140 мм, верхнего 70 мм, высота 200 мм, объем 2 л. Результаты, полученные с применением мини-конуса, приведены к стандартным значениям с помощью поправочных коэффициентов.



$$S = \frac{d_{\text{макс.}} + d_{\text{перп.}}}{2}$$



**Рисунок 1** – Определение диаметра расплыва смеси (Flow spread S, мм).

**Рисунок 2** – Определение времени растекания бетонной смеси (Slump flow time, T500, с).

Физико-механические свойства бетонов определяли по стандартным методикам. Прочностные показатели бетонов определяли на образцах-кубах с размером ребра 0,07 м (предел прочности при сжатии). Образцы твердели в нормальных условиях при температуре  $t = 20 \pm 2$  °С в течение 7, 28 и 90 суток.

Реологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Реологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей

№ состава	Текущность T <sub>500</sub> , с	D <sub>p</sub> , мм
1	7	500
2	5	550
3	5	550
4	3	570

Физико-механические характеристики самоуплотняющихся бетонов приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Физико-механические свойства бетонов

№ состава	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Показатели предела прочности на сжатие, МПа, в возрасте		
		7 суток	28 суток	90 суток
1	2 238	12,35	30,50	34,80
2	2 244	16,34	32,54	40,1
3	2 193	7,41	33,50	40,20
4	2 182	8,94	35,82	42,80

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ВЫВОДЫ

Все изученные составы бетонных смесей показали довольно высокие значения текучести по расплыву стандартного конуса. Отмечено увеличение на 13 % подвижности бетонной смеси, содержащей в своем

составе как комплексную добавку, так и золошлаковую смесь (состав № 4), по сравнению с контрольным составом (№ 1).

Можно рекомендовать применять самоуплотняющиеся бетонные смеси составов №№ 2–4 для изготовления неармированных или малоармированных бетонных конструкций – плит перекрытий, трубопроводов, облицовки туннелей, фундаментов.

Наблюдается снижение средней плотности на 3 % образцов, содержащих в своем составе золошлаковую смесь Зуевской ТЭС. Вероятно, это связано с присутствием в золошлаковой смеси органических частиц в виде несгоревшего углерода.

По результатам исследований установлено, что введение комплексной добавки и минерального наполнителя существенно влияет на прочностные характеристики бетонов в поздние сроки твердения. Наибольший эффект отмечен для состава № 4 (рост предела прочности при сжатии в возрасте 90 суток на 23 %). Прочностные характеристики бетонов в начальные сроки твердения выше примерно на 40 % для составов №№ 1–2, не содержащих минеральную добавку. Но по достижении образцов проектного возраста 28 суток наблюдается значительный рост и выравнивание прочностных показателей составов №№ 3–4, содержащих золошлаковую смесь.

Таким образом, по полученным данным можно сделать вывод о положительном влиянии совместной работы комплексной добавки, состоящей из модификатора вязкости и пластификатора и золошлаковой смеси на исследованные свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов. Для изученных составов бетонов несовместимости данного модификатора вязкости и суперпластификатора не отмечено.

В дальнейшем предполагается изучить влияние комплексной добавки на показатели седиментации крупного заполнителя в составе самоуплотняющихся бетонных смесей для обеспечения их стойкости к расслоению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков, В. Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы / В. Г. Батраков. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 4–7.
2. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В. Г. Батраков. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Технопроект, 1998. – 768 с. – Текст : непосредственный.
3. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1999. – № 6. – С. 6–10. – Библиогр.: с. 10 (12 назв.).
4. Егорова, Е. В. Самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональным модификатором на основе отходов промышленности : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Егорова Елена Владимировна : ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2016. – 161 с. – Библиогр.: с. 10–18. – Текст : непосредственный.
5. Research on synthesis and action mechanism of polycarboxylate superplasticizer / Hui Wu, Huiling Guo, Jiaheng Lei [и др.]. – Текст : электронный // Front. Chem. China 2. – 2007. – P. 322–325. – URL : <https://doi.org/10.1007/s11458-007-0060-2> (дата обращения: 25.12.2020).
6. Ohta, A. Fluidizing Mechanism and Applications of Polycarboxylate-Based Superplasticizers / A. Ohta, T. Sugiyama, Y. Tanaka. – Текст : электронный // the Fifth CANMET/ACI International Conf., SP-173, 1997: Proc. – Rome (Italy), 1997. – P. 359–378. – URL : <https://trid.trb.org/view/475927> (дата обращения: 25.12.2020).
7. Комаринский, М. В. Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси / М. В. Комаринский, С. И. Смирнов, Д. Е. Бурцева. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – Выпуск 11(38). – С. 106–118. – Библиогр.: с. 115 (30 назв.).
8. Зайченко, Н. М. Модифицированные цементные бетоны для устойчивого развития : учебное пособие / Н. М. Зайченко. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 474 с. – ISBN 978-5-4486-0132-3 // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/70268.html> (дата обращения: 25.12.2020). – Режим доступа: для авторизир. пользователей. – Текст : электронный.

Получена 11.01.2021

О. В. ЕГОРОВА, К. Т. БОРОДАЙ, К. О. КОРЧАГИНА, М. М. ВОДОЛАД,  
М. Е. ВОРОНЕНКО  
БЕТОН, ЩО САМОУЩІЛЬНЮЄТЬСЯ, З КОМПЛЕКСНОЮ ДОБАВКОЮ НА  
ОСНОВІ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ДОНБАСУ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У роботі досліджено вплив комплексної добавки, що складається з модифікатора в'язкості і суперпластифікатора, на реологічні властивості бетонних сумішей, що самоущільнюються, та фізико-механічні властивості таких бетонів. Як мінеральний наповнювач застосовували золошлакову суміш Зуївської ТЕС. Усі вивчені склади бетонних сумішей мають досить високі значення рухливості. Встановлено, що використання як мінерального наповнювача золошлакової суміші і введення комплексної добавки до складу бетонів, що самоущільнюються, збільшує характеристики міцності як в ранні, так і в більш пізні терміни твердіння. Таким чином, не відзначено несумісності використаного модифікатора в'язкості і суперпластифікатора і їх спільного негативного впливу на вивчені властивості бетонних сумішей і бетонів, що самоущільнюються. Можна рекомендувати застосовувати бетонні суміші вивчених складів для виготовлення неармованих або малоармованих бетонних конструкцій.

**Ключові слова:** бетон, що самоущільнюється, рухливість, міцність, модифікатор в'язкості, суперпластифікатор.

ELENA EGOROVA, EKATERINA BORODAY, KARINA KORCHAGINA,  
MAXIM VODOLAD, MAXIM VORONENKO  
SELF-COMPACTING CONCRETE WITH A COMPLEX ADDITIVE BASED ON  
INDUSTRIAL WASTE FROM DONBASS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The paper investigates the effect of a complex additive consisting of a viscosity modifier and a superplasticizer on the rheological properties of self-compacting concrete mixtures and the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. The ash and slag mixture of Zuevskaya TPP was used as a mineral filler. All studied compositions of concrete mixes had rather high values of mobility. It has been established that the use of an ash and slag mixture as a mineral filler and the introduction of a complex additive into the composition of self-compacting concretes increases the strength characteristics both in the early and later periods of hardening. Consequently, no incompatibility of the used viscosity modifier and superplasticizer and their joint negative effect on the studied properties of self-compacting concrete mixtures and concretes was noted. It is possible to recommend the use of self-compacting concrete mixtures of the studied compositions for the manufacture of unreinforced or low-reinforced concrete structures.

**Key words:** self-compacting concrete, mobility, strength, viscosity modifier, super plasticizer.

**Егорова Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны.

**Бородай Екатерина Таировна** – ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: усовершенствование физико-механических свойств огнеупорных вяжущих и бетонов.

**Корчагина Карина Александровна** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

**Водолад Максим Николаевич** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны.

**Вороненко Максим Эдуардович** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: применение химических добавок в высокофункциональных бетонах.

**Егорова Елена Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони, що самоущільнюються.

**Бородай Катерина Таєрівна** – асистент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вдосконалення фізико-механічних властивостей вогнетривких в'язучих та бетонів.

**Корчагіна Карина Олександрівна** – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони з високими експлуатаційними характеристиками.

**Водолад Максим Миколайович** – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони, що самоущільнюються.

**Вороненко Максим Едуардович** – магістрант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: застосування хімічних добавок у високофункціональних бетонах.

**Egorova Elena** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: self-compacting concretes.

**Boroday Ekaterina** – Assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of physical and mechanical properties of refractory binders and concrete.

**Korchagina Karina** – master's student, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: high performance concrete.

**Vodolad Maxim** – master's student, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: self-compacting concretes.

**Voronenko Maxim** – master's student, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the use of chemical additives in High Performance Concretes.



УДК 691.168

**О. А. ПШЕНИЧНЫХ, А. Л. ПОЖИДАЕВА, Д. С. МИХАЙЛЮК, А. А. РАКУЛЕНКО, Р. Э. СЕРЕДА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АРМИРОВАНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ**

**Аннотация.** В статье проанализированы эффективные способы дисперсного армирования дорожных асфальтобетонных смесей с учетом свойств армирующих полимерных волокон в странах Европейского Союза, Соединенных Штатах Америки, Канаде и Российской Федерации. Указаны недостатки и преимущества существующих способов дисперсного армирования асфальтобетонных смесей. Показано, что, например, для наиболее равномерного распределения полипропиленовых волокон целесообразно вводить волокна в смеситель с готовой асфальтобетонной смесью в течение 5–10 секунд. Выполнен сравнительный анализ физико-механических свойств наиболее распространенных типов волокон: полипропиленового, полиэтилентерефталатного, а также стекловолокна. Установлено, что дисперсное армирование асфальтобетона стекловолокном позволяет на 40...50 % повысить усталостную долговечность при воздействии больших нормативных нагрузок.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, синтетические волокна, стекловолокно, полипропиленовое волокно, полиэтилентерефталатное волокно, способы дисперсного армирования.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Асфальтобетон в дорожных покрытиях подвергается воздействию статических и динамических нагрузок от проходящего транспорта, влиянию погодных факторов и прежде всего в климатических условиях юга Российской Федерации воздействию высоких температур, ультрафиолетовому, радиационному и инфракрасному облучению, действию кислорода воздуха, попеременному замораживанию-оттаиванию, длительному водонасыщению.

Во время эксплуатации на поверхности дорожного покрытия образуются и накапливаются деформации в виде продольных и поперечных волн и сдвигов. Это обусловлено низкой деформационной устойчивостью асфальтобетона при повышенных температурах и недостаточным сцеплением с нижележащим слоем дорожной одежды. Волны и сдвиги возникают прежде всего в условиях высокой интенсивности движения и в местах остановок и на пересечениях автомобильных дорог.

В связи с этим специалистами в дорожной области уделяется большое внимание вопросу повышения деформационно-прочностных свойств дорожно-строительных материалов и повышения сроков службы асфальтобетонных покрытий в целом [1].

За последние несколько десятилетий разработано достаточное количество прогрессивных методов модифицирования асфальтобетонных смесей, значительно повышающих деформационно-прочностные характеристики асфальтобетонов. Одним из наиболее эффективных способов повышения долговечности асфальтобетонов в тяжелых условиях эксплуатации является введение армирующих высокопрочных волокон в асфальтобетонную смесь. Для этого используются различные типы волокон, в том числе синтетические и натуральные волокна.

В странах США и Европы при армировании асфальтобетонных смесей применяют нейлон, полиэфир, полипропилен и углерод. При этом, как правило, используется метод случайного распределения волокон внутри дорожно-строительных материалов [2].

Еще одним широко применяемым армирующим материалом являются асбестовые волокна. В начале 1900-х годов компания «WarrenBrothers» из Бостона запатентовала технологию применения асбестовых волокон в асфальтобетоне с целью предотвращения проникания влаги в асфальтобетон в процессе эксплуатации.

© О. А. Пшеничных, А. Л. Пожидаева, Д. С. Михайлюк, А. А. Ракуленко, Р. Э. Серед, 2021

В работе [3] показано, что волокна асбеста могут значительно повысить устойчивость к деформациям асфальтобетонных смесей. С 1960-х годов применение асбестовых волокон было запрещено из-за опасности для здоровья человека и окружающей среды [4].

При фиброармировании асфальтобетонов нерешенной проблемой остается неравномерное распределение армирующих волокон в асфальтобетонной смеси. Слишком длинные волокна в асфальтобетонной смеси своим спутыванием и переплетением могут образовывать повышенную концентрацию волокон в локальных местах, тем самым не обеспечивая их равномерное распределение по всему объему асфальтобетонной смеси [5]. В то время как слишком короткие волокна не могут обеспечить усиливающий эффект. Кроме того, при производстве дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей трудно добиться равномерного распределения волокон, чтобы в дальнейшем предотвратить концентрацию напряжений в локальных местах структуры уложенного асфальтобетона. Низкое содержание волокон увеличивает вероятность слабого армирующего эффекта, в то время как высокое содержание волокон снижает адгезионные свойства между минеральной частью и органическим вяжущим.

**Целью данной работы** является сравнительный анализ существующих методов дисперсного армирования с учетом свойств армирующих полимерных волокон в странах Европейского союза, Соединенных Штатов Америки, Канады и Российской Федерации.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ СТАТЬИ

Для дисперсного армирования применяют два способа армирования дорожно-строительных материалов: сухой и мокрый способы. Армирование асфальтобетонной смеси сухим способом происходит в процессе перемешивания минеральных компонентов. Процесс армирования мокрым способом зависит от типа волокон и природы их происхождения [6]. При мокром способе армирующие волокна смешиваются с органическим вяжущим. Затем асфальтовяжущее вещество добавляют к минеральным компонентам. Преимущество и недостатки способов дисперсного армирования приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Преимущества и недостатки способов дисперсного армирования

№ п/п	Способ армирования	Преимущества	Недостатки
1	Сухой способ	Лучшее диспергирование и распределение волокон в асфальтобетонной смеси. Уменьшение концентрации волокон в одном месте.	Уменьшает адгезию между минеральной частью и органическим вяжущим из-за расплавления волокон при добавлении к горячим минеральным компонентам.
2	Мокрый способ	Применяется при использовании полиэтилена низкой и высокой плотности, полипропилена с температурой плавления ниже 160 °С.	Происходит слипание волокон. Из-за высокой температуры плавления волокон, затрудняется получение однородной смеси. Появляется склонность отделения волокон от органического вяжущего.

Некоторые исследователи изменили способы модификации, чтобы добиться лучшего диспергирования волокна. Например, введение армирующих волокон происходило после перемешивания органического вяжущего с минеральной частью [7]. Данный способ назвали модифицированным сухим процессом. Предполагается, что модифицированный сухой способ приведет к незначительным изменениям формы и свойств армированных материалов.

В работе [8] выполнено визуальное сравнение мокрого и сухого способов армирования асфальтобетонной смеси полипропиленовыми волокнами. Исследования показали, что при мокром способе происходит неравномерное распределение полипропиленовых волокон среди минеральных материалов. Армирование асфальтобетонной смеси полипропиленовыми волокнами сухим способом показало такие же результаты, что и при армировании мокрым способом. Следовательно, оба способа армирования асфальтобетонной смеси были признаны не подходящими при армировании асфальтобетонной смеси полипропиленовыми волокнами. Отмечается, что равномерного распределения полипропиленовых волокон удастся добиться, вводя волокна в небольших количествах (5...10 % от

общего количества) в процессе перемешивания миксером готовой асфальтобетонной смеси в течение 5–10 секунд.

Рассмотрим подробно свойства и способы армирования асфальтобетонных смесей современными армирующими волокнами, применяемыми в странах Европы, США и Российской Федерации.

### 1. Полипропиленовые волокна

Полипропиленовые волокна (ПП) широко используются в качестве армирующего материала в асфальтобетоне [9]. Данный материал имеет низкую стоимость, широкую доступность, высокую температуру размягчения и хорошие механические свойства. В таблице 2 приведены физико-механические свойства полипропиленовых волокон.

**Таблица 2** – Физико-механические свойства полипропиленовых волокон

Цвет	белый
Длина, мм	12...19
Диаметр, мкм	Около 100
Температура плавления, °С	160...170
Температура вспышки, °С	590
Предел прочности на разрыв, МПа	560...770
Модуль упругости, МПа	3 500
Коррозионная стойкость к кислотам и щелочам	Очень высокая

В работе [10] показано, что добавление полипропиленовых волокон положительно влияет на характеристики асфальтобетонного покрытия в процессе эксплуатации. Содержание 1 % ПП волокон повышает усталостную долговечность на 27 %. В работе [11] авторы отмечают, что при введении 1 % ПП на 10...15 % повышается сдвигоустойчивость по методу Маршалла, снижается в 1,5 раза коэффициент температурной чувствительности. В работе [12] проведены исследования армирования ПП волокнами асфальтобетонной смеси сухим и мокрым способом. Результаты исследования свидетельствуют, что при армировании асфальтобетонной смеси 3 % ПП мокрым способом увеличивается плотность и однородность материала в сравнении с 1 % ПП и 2 % ПП. В то же время, армирование асфальтобетонной смеси сухим способом 1 % ПП также приводит к повышению деформационно-прочностных свойств армированного асфальтобетона в сравнении с концентрацией фиброарматуры в асфальтобетоне 2 и 3 % ПП.

### 2. Полиэтилентерефталатное волокно

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) представляет собой термопластичную полимерную смолу сложного полиэфира, полученную полимеризацией этиленгликоля и терефталевой кислоты и широко используется для производства пластиковых бутылок [13]. Технические характеристики ПЭТ приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Физико-механические свойства ПЭТ

Плотность вес, г/см <sup>3</sup>	1,35
Водопоглощение, %	0,11
Предел прочности при растяжении, МПа	80
Модуль упругости при растяжении, МПа	2750
Относительное удлинение при разрыве, %	70
Прочность на изгиб, МПа	105
Модуль упругости при изгибе, МПа	2750
Температура стеклования, °С	75
Температура плавления, °С	от 250

Большинство мирового производства ПЭТ приходится на синтетические волокна, используется при производстве бутылок [14], 30 % мирового спроса. Большой срок службы ПЭТ из-за высокой устойчивости к биоразложению ведет к значительному его накоплению в виде отходов, что создает серьезную экологическую проблему, особенно для Российской Федерации. В странах Европы в связи с растущей заботой о чистоте окружающей среды дорожная промышленность в достаточно

больших объемах перерабатывает отходы ПЭТ, применяя их в качестве добавки в асфальтобетон или вместо мелкодисперсного минерального заполнителя. ПЭТ можно добавлять как сухим, так и мокрым способом.

Большинство зарубежных исследователей указывают на целесообразность использования сухого способа введения ПЭТ в асфальтобетонную смесь как часть твердых материалов из-за его высокой температуры плавления, которая находится в диапазоне от 250 до 300 °С. При использовании мокрого способа невозможно добиться однородного распределения ПЭТ, так как температура органического вяжущего во время смешивания существенно ниже температуры плавления полиэтилентерефталата [15].

Исследования [16] показали, что содержание 5 % ПЭТ в асфальтобетонной смеси повышает устойчивость армированного асфальтобетона при высоких температурах, предел прочности при сжатии повышается в 1,2–1,3 раза.

### 3. Стекловолокно

Стекловолокно обладает интересными свойствами в качестве армирующего материала благодаря своей прочности и гибкости, также оно термически и химически стабильно при температуре 200 °С.

Стекловолокно – это неорганическое волокно с высокой прочностью на разрыв, хорошей гибкостью, термически и химически стабильно при температуре 200 °С. Широко используется для эффективного модифицирования асфальтобетонной смеси с целью увеличения деформационно-прочностных характеристик в странах Европы и США [17].

Использование асфальтобетонных смесей, армированных стекловолокном, повышает стоимость строительства, но минимизирует затраты на техническое обслуживание дорожного покрытия благодаря повышенным деформационно-прочностным показателям. Стекловолокно широко используется благодаря механическим свойствам и доступной цене по сравнению с различными углеродными волокнами, арамидными и базальтовыми. Свойства стекловолокна приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Физико-механические свойства стекловолокна

Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,58
Водопоглощение, %	0,11
Длина, мм	12
Предел прочности при растяжении, МПа	3 100...3 400
Температура размягчения, °С	840
Диаметр нити, мкм	13
Влагосодержание, %	0,03

Исследования [18] показали, асфальтобетонная смесь, содержащая 0,2 % стекловолокна, обладает способностью противостоять значительным динамическим транспортным нагрузкам, возникающим в дорожном покрытии. Увеличивается на 40...50 % усталостная долговечность при воздействии больших растягивающих напряжений (2...3 МПа) от динамических нагрузок. Также на 10...20 % возрастает жесткость на изгиб и модуль упругости, повышается устойчивость асфальтобетонов при высоких температурах окружающей среды. Характерно, что введение стекловолокна в асфальтобетонную смесь целесообразно производить сухим способом.

## ВЫВОДЫ

Введение в асфальтобетонную смесь синтетических волокон на основе полипропилена, полиэтилентерефталата и стекловолокна в среднем на 20...30 % повышает деформационно-прочностные характеристики армированного асфальтобетона. Армирование смеси приводит к равномерному распределению напряжений от нагрузки автомобильного транспорта внутри структуры материала, уменьшается образование очагов концентрации критических напряжений в зоне контакта органического вяжущего с минеральным материалом. Увеличивается сопротивление к образованию колеи и усталостному растрескиванию.

Проблема равномерного распределения армирующих волокон внутри структуры асфальтобетонной смеси до конца не изучена. Для получения высоких результатов при армировании асфальтобетонной смеси необходимо учитывать свойства армирующих волокон, способы их введения и факторы, влияющие на распределения волокон в асфальтобетонной смеси.

Применение стекловолокна для армирования асфальтобетонных смесей наиболее целесообразно благодаря его невысокой себестоимости, хорошему распределению внутри структуры материала и значительному повышению устойчивости армированного асфальтобетона к разрушающему воздействию динамических нагрузок от автомобильного транспорта. Разработка асфальтобетонных смесей армированных стекловолокном для условий Донецкой Народной Республики и Российской Федерации представляет большой научный интерес.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модифицированная щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь дисперсно-армирующей добавкой «Forta» / С. К. Илиополов, И. В. Мардиросова, С. А. Чернов, П. О. Дармодехин. – Текст : электронный // Интернет-журнал науковедение. – 2012. – № 3(12) – С. 1–10. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=18818624> (дата обращения: 01.01.2021). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
2. Дедюхин, А. Ю. Перспективы и проблемы использования отходов производства асбеста для дорожного строительства / А. Ю. Дедюхин, С. И. Булдаков. – Текст : электронный // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2008. – № 3(60). – С. 115–117. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=11162055>. (дата обращения 01.01.2021). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
3. Дедюхин, А. Ю. Применение техногенных отходов переработки хризотила в дорожном строительстве / А. Ю. Дедюхин, И. Н. Кручинин, В. Н. Мелькумов. – Текст : электронный // Научный вестник воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2009. – № 4(16). – С. 141–147. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=12955055>. (дата обращения 01.01.2021). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
4. Kietzman, J. H. Effect of Short Asbestos Fibers on Basic Physical Properties of Asphalt Pavement Mixes / J. H. Kietzman. – Текст : непосредственный // Highway Research Board Bulletin. – 1960. – No. 270. – P. 20–25.
5. Jahromi, S. G. Effect of carbon nanofiber on mechanical behavior of asphalt concrete / S. G. Jahromi. – Текст : непосредственный // International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology. – 2015. – № 6(2). – P. 57–66.
6. Putman, B. J. Effects of Fiber Finish on the Performance of Asphalt Binders and Mastics / B. J. Putman. – <https://doi.org/10.1155/2011/172634>. – Текст : электронный // Advances in Civil Engineering. – 2011. – P. 1–11. URL : <https://downloads.hindawi.com/journals/ace/2011/172634.pdf>. (дата обращения 01.01.2021).
7. Moghaddam, T. B. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test / T. B. Moghaddam Soltani, M. R. Karim. – Текст : непосредственный // Materials and Design. – 2014. – № 53. – P. 317–324.
8. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt / E. Ahmadinia, M. Zargar, M. R. Karim [et al.]. – Текст : непосредственный // Materials and Design. – 2011. – № 32. – P. 4844–4849.
9. Zahedi, M. The most appropriate mixing method of polypropylene fiber with aggregates and bitumen based on binder mix design / M. Zahedi, R. Bayat, M. N. Jalal. – Текст : непосредственный // International Journal of Engineering & Technology. – 2014. – № 3(3). – P. 333–336.
10. Otuoze, H. S. An experimental study on the use of polypropylene waste in bituminous mix / H. S. Otuoze, A. A. Shuaibu. – Текст : непосредственный // Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH). – 2017. – № 36(3). – P. 677–685.
11. Kim, M. J. Enhancing mechanical properties of asphalt concrete using synthetic fibers / M. J. Kim, D. Y. Kim, H. O. Shin. – Текст : непосредственный // Construction and Building Materials. – 2018. – № 178. – P. 233–243.
12. Al-Hadady, A. I. Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements / A. I. Al-Hadady, T. Yi-qiu. – Текст : непосредственный // Materials and Design. – 2009. – № 30. – P. 1133–1140.
13. Modarres, A. Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes / A. Modarres, H. Hamed. – Текст : непосредственный // Materials and Design. – 2014. – № 61. – P. 8–15.
14. Deghan, Z. Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test / Z. Deghan, A. Modarres. – Текст : непосредственный // Construction and Building Materials. – 2017. – № 39. – P. 384–393.
15. Review of glass fiber grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR / M. L. Nguyen, J. Blanc, J. P. Kerzreho, P. Hornych. – Текст : непосредственный // Road Materials and Pavements Design. – 2013. – № 14(1). – P. 287–308.
16. Choudhary, R. Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process / R. Choudhary, A. Kumar, K. Murkute. – Текст : непосредственный // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – № 62(3). – P. 2–7.
17. Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture. / Q. Guo, L. Li, Y. Cheng [et al.]. – Текст : непосредственный // Materials and Design. – 2015. – № 66. – P. 51–59.
18. Mahreh, A. Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiberglass / A. Mahreh, M. R. Karim. – Текст : непосредственный // International Journal of the Physical Sciences. – 2010. – № 5(12). – P. 1840–1847.

Получено 12.01.2021

О. О. ПШЕНИЧНИХ, А. Л. ПОЖИДАЄВА, Д. С. МИХАЙЛЮК,  
О. О. РАКУЛЕНКО, Р. Е. СЕРЕДА  
АРМУВАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ СИНТЕТИЧНИМИ  
ВОЛОКНАМИ  
ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**Анотація.** У статті проаналізовано ефективні способи дисперсного армування дорожніх асфальтобетонних сумішей з урахуванням властивостей армуючих полімерних волокон в країнах Європейського Союзу, Сполучених Штатах Америки, Канаді та Російської Федерації. Вказано недоліки і переваги існуючих способів дисперсного армування асфальтобетонних сумішей. Показано, що, наприклад, для найбільш рівномірного розподілу поліпропіленових волокон доцільно вводити волокна в змішувач з готовою асфальтобетонною сумішшю протягом 5–10 секунд. Виконано порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей найбільш поширених типів волокон: поліпропіленового, поліетилентерефталатного, а також скловолокна. Встановлено, що дисперсне армування асфальтобетону скловолокном дозволяє на 40...50 % підвищити втомну довговічність під дією великих нормативних навантажень.

**Ключові слова:** асфальтобетон, синтетичні волокна, скловолокно, поліпропіленове волокно, поліетилентерефталатне волокно, способи дисперсного армування.

OLEG PSHENICHNYKH, ALLA POZHIDAEVA, DANIIL MIKHAILYUK,  
ALEXANDER RAKULENKO, RODION SEREDA  
REINFORCEMENT OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH SYNTHETIC  
FIBERS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article analyzes the effective methods of dispersed reinforcement of road asphalt concrete mixtures taking into account the properties of reinforcing polymer fibers in the countries of the European Union, the United States of America, Canada and the Russian Federation. The disadvantages and advantages of the existing methods of dispersed reinforcement of asphalt concrete mixtures are indicated. It is shown that, for example, for the most uniform distribution of polypropylene fibers, it is advisable to introduce fibers into a mixer with a ready-made asphalt concrete mixture for 5–10 seconds. A comparative analysis of the physical and mechanical properties of the most common types of fibers: polypropylene, polyethylene terephthalate, and glass fiber has been carried out. It has been established that dispersed reinforcement of asphalt concrete with fiberglass makes it possible to increase fatigue life by 40...50 % when exposed to large standard loads.

**Key words:** asphalt concrete, synthetic fibers, glass fiber, polypropylene fiber, polyethylene terephthalate fiber, methods of dispersed reinforcement.

**Пшеничных Олег Александрович** – ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

**Пожидаева Алла Леонидовна** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

**Михайлюк Даниил Сергеевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

**Ракуленко Александр Александрович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

**Серета Родион Эдуардович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны, армированные полимерными волокнами.

**Пшеничних Олег Олександрович** – асистент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ. Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

**Пожидаева Алла Леонідівна** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

**Михайлюк Данило Сергійович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

**Ракуленко Олександр Олександрович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

**Середя Родіон Едуардович** – магістрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексно-модифіковані асфальтополімербетони, армовані полімерними волокнами.

**Pshenichnykh Oleg** – Assistant, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.

**Pozhidaeva Alla** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.

**Mikhailyuk Daniil** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.

**Rakulenko Alexander** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.

**Sereda Rodion** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex-modified asphalt-polymer concrete reinforced with polymer fibers.

УДК 544.015.2

С. А. ФРОЛОВА, О. В. СОБОЛЬ, А. Ю. СОБОЛЕВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАВНОВЕСНОЙ И  
НЕРАВНОВЕСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВИСМУТА ПО  
ТЕРМОГРАММАМ**

**Аннотация.** На основании термограмм висмута, полученных при квазиравновесной (КРК) и неравновесно-взрывной (НРВК) кристаллизациях, исследованы процессы плавления и кристаллизации (при КРК); зародышеобразования, коагуляции и изотермической докристаллизации (при НРВК). Найдены термокинетические параметры, определенные непосредственно по кривым нагревания-охлаждения (время плавления  $\tau_L^0$  и кристаллизации  $\tau_S^0$ , скорости нагревания  $v_{нагр}$  и охлаждения  $v_{охл}$  и т. п.), которые были использованы для расчета скорости массовой кристаллизации  $U_S$ , температурной скорости  $\varpi$  взрывной кристаллизации, доли  $\alpha$  зародышей в переохлажденном расплаве, доли  $\beta$  скоагулировавшего расплава за время  $\tau_2$  и т. п.). Установлена существенная разница в параметрах кристаллизации типа КРК и НРВК, связанная с тем, что для КРК практически выпадает этап зародышеобразования и коагуляции.

**Ключевые слова:** висмут, термический анализ, перегрев, кристаллизация, переохлаждение, зародышеобразование, время кристаллизации, скорость кристаллизации.

Среди различных термических режимов, используемых для изучения фазовых переходов, особое место занимают периодические процессы или термоциклы, обеспечивающие естественное многократное повторение эксперимента в одних и тех же условиях. Термоциклы дают значительно большее по сравнению с другими процессами количество информации о свойствах исследуемой системы. Таковыми методами в частности являются методы циклического термического анализа (ЦТА) и дифференциального термического анализа (ДТА) [1]. Источником информации для процессов кристаллизации при термоциклировании есть группа параметров, характеризующих изучаемую систему массой  $m$ :

$T_L$  – температура плавления (или температура ликвидуса для сплавов);

$T_S$  – температура кристаллизации (или температура солидуса для сплавов);

$\Delta T^+$  – величина перегрева относительно температуры  $T_L$  плавления (или температуры ликвидуса для сплавов);

$\Delta T_L^- = T_L - T(T_L > T)$  – степень предкристаллизационного переохлаждения относительно температуры плавления или температуры ликвидуса для сплава;

$\Delta T_S^- = T_S - T(T_S > T)$  – степень переохлаждения относительно температуры солидуса;

$T_k^+$  – температура структурных перестроек в жидкой фазе, т. е. критический перегрев расплава, при котором меняется вид кристаллизации от квазиравновесной без переохлаждений к неравновесно-взрывной со значительным переохлаждением, или наоборот;

$\Delta H_{LS}$  – удельная теплота плавления;

$\tau_L \approx \tau_L^0$  – время плавления при КРК и НРВК;

$\tau_S^0$  – время кристаллизации при КРК;

$\tau_S$  – общее время при НРВК ( $\tau_S = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ );

$\tau_1$  – инкубационный период зарождения новой фазы;

$\tau_2$  и  $\varpi$  – время и температурная скорость взрывной кристаллизации;

$\tau_3$  – время докристаллизации расплава;

$v_{нагр}$ ,  $v_{охл}$  – скорости нагрева и охлаждения.

© С. А. Фролова, О. В. Соболев, А. Ю. Соболев, 2021



Для определения термокинетических параметров был использован последовательный циклический термический анализ (ЦТА). Сущность метода ЦТА заключается в достижении специально подобранным режимом включения или выключения минимального различия в температурах печи и образца (за счёт инерционности печи). Тем самым с повышенной чувствительностью регистрируются температуры термических превращений. Для обнаружения новых эндо- и экзотермических эффектов проверялся каждый градус, после чего тщательно исследовался обнаруженный фазовый переход путем термоциклирования. С этой целью нижняя граница  $T_{нижн} < T_L$  поддерживалась постоянной, а верхнюю границу повышали либо понижали относительно предыдущего цикла на 1–2 градуса.

По полученным термограммам нагревания и охлаждения, характеризующим квазиравновесную и неравновесно-взрывную кристаллизацию, вычислялись следующие параметры:

– скорость массовой кристаллизации  $\nu_s$ :

$$\text{при КРК: } \nu_s = \frac{m}{\tau_s^0}, \quad \text{при НРВК: } \nu_s = \frac{m}{\tau_3};$$

– температурная скорость  $\varpi$  взрывной кристаллизации  $\bar{\omega} = \frac{\Delta T^-}{\tau_2}$ ;

– доля  $\alpha$  всех зародышей в переохлаждённом расплаве, образовавшихся за время  $\tau_1$ :  $\alpha = \frac{\tau_1}{\tau_s}$ ;

– доля  $\beta$  расплава, затвердевшего в объёме  $V_x$  (массой  $m_x$ ) за время  $\tau_2$ . Значение  $\beta$  вычисляется из уравнения теплового баланса  $Q \approx Q_2$ , где  $Q_2 = m_x \Delta H_{LS}$  – теплота фазового перехода при кристаллизации части вещества массой  $m_x$  за время  $\tau_2$ , приведшая к прогреву  $Q = c_p^L m \Delta T^-$  всего вещества массой  $m$  на величину  $\Delta T^-$ . Учтено, что скорость теплоотвода на два-три порядка меньше скорости выделения теплоты при взрывной кристаллизации.  $\beta = \frac{m_x}{m} = \frac{c_p^L \cdot \Delta T^-}{\Delta H_{LS}}$ , где  $c_p^L$  – удельная теплоёмкость жидкой фазы,  $\Delta H_{LS}$  – энтальпия плавления;

– константа  $k$  скорости коагуляции зародышей  $k = \frac{1}{\tau_2} \ln \frac{\alpha}{\beta}$ . К процессу коагуляции зародышей применена формальная кинетика гомогенных односторонних реакций. Учитывая быстрый характер этой реакции, ее можно приближенно считать реакцией первого порядка [2], подчиняющейся уравнению  $\beta = \alpha \exp(-k_B \tau_2)$ , где  $\alpha$  – начальная концентрация зародышей во всем образце,  $\beta$  – концентрация зародышей в объёме  $V_x$ , убывающая за время  $\tau_2$  за счет их коагуляции и образования сплошной твердой фазы долей  $\beta$  в том же объёме;  $k_B$  – постоянная Больцмана;

– незатвердевшая часть  $\gamma$  образца за время  $\tau_2$ :  $\gamma = \tau_3 / \tau_s$ . Этот параметр определяется по отношению промежутков времени  $\tau_3$  (НРВК) к  $\tau_s^0$  (КРК) по длинам плато для одного и того же образца при прочих равных условиях эксперимента;

– затвердевшая часть  $1-\gamma$ . Учитывается как затвердевшая доля  $\beta$  зародышей в объёме  $V_x$ , так и зародышей  $\alpha$  в оставшейся части расплава;

– доля  $\delta$  зародышей, не задействованных в коагуляции (т. е. доля зародышей в объёме  $V-V_x$ ):

$$\delta = \alpha - \beta;$$

– скорость  $\nu_3$  изотермического дозатвердевания при НРВК за время  $\tau_3$ :

$$\nu_3 = \frac{m(1-\alpha)}{\tau_3};$$

– константы  $Z$  скорости кристаллизации [3]:

$$\text{при КРК } Z_1 = \frac{1}{\tau_s^0} \ln \frac{\rho_s}{\rho_L}, \quad \text{при НРВК } Z_2 = \frac{1}{\tau_3} \ln \frac{\rho_s}{\rho_L},$$

где  $\rho_s, \rho_L$  – плотности твёрдой и жидкой фаз;

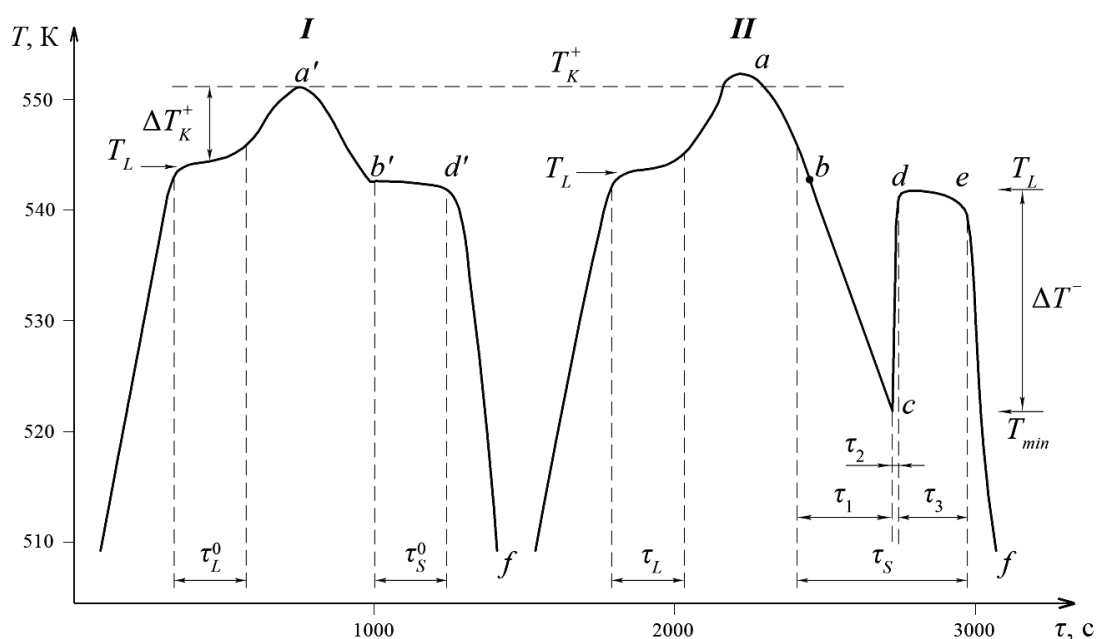
– критический размер  $l_k$  зародыша кубической формы [4]

$$l_k = \frac{4\sigma_{LS}}{\rho_s \Delta H_{LS} - c_p \Delta \rho (T_L - \Delta T^-)};$$

– работа  $A_k$  образования зародыша размером  $l_k$  [5]

$$A_k = \frac{32\sigma_{LS}^3}{(\rho_S \Delta H_{LS} - c_P \Delta \rho (T_L - \Delta T^-))^2}$$

В работах [5, 6] нами было показано, что в зависимости от величины прогрева  $\Delta T^+$  расплава и при дальнейшем охлаждении меняется характер кристаллизации от квазиравновесной (КРК) без переохлаждения к неравновесно-взрывной (НРВК) из переохлаждённого состояния. В данной работе ставилась задача вычисления параметров обоих видов кристаллизации по термограммам плавкости на примере висмута. Для этого были выбраны две последовательно записанные термограммы на одном и том же образце висмута массой 4 г (рисунок).



**Рисунок** – Термограммы плавкости, характеризующие равновесную (I) и неравновесно-взрывную (II) кристаллизацию.

По термограммам определялись такие параметры, как время  $\tau_L$  плавления, скорость плавления  $\nu_L$ , общее время  $\tau_S$  при неравновесной кристаллизации, инкубационный период  $\tau_1$  зародышеобразования, время  $\tau_2$  коагуляции зародышей, время  $\tau_3$  изотермического дозатвердевания, время затвердевания  $\tau'_S$  при равновесной кристаллизации, температура плавления  $T_L$ , минимальная температура  $T_{min}$  начала взрывной кристаллизации, физическое переохлаждение  $\Delta T^-$ . Из термограмм I и II на рисунке видно, что при неравновесной кристаллизации  $\tau_S = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ , а также  $\tau_S > \tau_L$ . При равновесной кристаллизации  $\tau_L = \tau'_S$ .

Используя эти данные и физические характеристики висмута (табл. 1), вычислялись следующие кинетические и термодинамические параметры кристаллизации.

**Таблица 1** – Теплофизические характеристики висмута

$T_L$ , К	$\Delta H_{LS}$ , кДж/кг	$\sigma$ , мДж/м <sup>2</sup>	$c_{pS}$ , Дж/кг×К	$c_{pL}$ , Дж/кг×К	$\rho_S$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	$\rho_L$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>
544,6	54,69	54,4	143,0	146,2	10,070	10,050

Измеренные и вычисленные значения параметров кристаллизации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения кинетических параметров плавления и кристаллизации висмута

Параметры		КРК	НРВК
Масса образца	$m$ , г	4	4
Время плавления	$\tau_1$ , с	174	174
Время кристаллизации	$\tau_2$ , с	174	350,0
Скорость охлаждения	$v_{охл}$ , К/с	0,09...0,11	0,09...0,11
Скорость массовой кристаллизации	$v_s$ , г/с	$22,99 \cdot 10^{-3}$	$11,43 \cdot 10^{-3}$
Время зародышеобразования	$\tau_1$ , с	–	203,0
Время коагуляции	$\tau_2$ , с	–	1,0
Время докристаллизации	$\tau_3$ , с	–	146,0
Степень переохлаждения при НРВК	$\Delta T^-$ , К	0	20,0
Температурная скорость взрывной кристаллизации	$\varpi$ , К/с	–	20,0
Доля всех зародышей в переохлажденном расплаве, образовавшихся за время $\tau_1$	$\alpha$	–	0,58
Доля расплава, затвердевшего в объеме $V_x$ за время $\tau_2$	$\beta$	–	0,05
Константа скорости коагуляции зародышей	$k$	–	2,45
Незатвердевшая часть образца за время $\tau_3$	$\gamma$	–	0,42
Затвердевшая часть образца	$1-\gamma$	–	0,58
Доля зародышей, не задействованных в коагуляции	$\delta$	–	0,53
Скорость изотермического дозатвердевания при НРВК	$v_3$ , кг/с	–	$11,51 \cdot 10^{-6}$
Константа скорости кристаллизации	$Z$ , с <sup>-1</sup>	$-0,18 \cdot 10^{-3}$	$-0,21 \cdot 10^{-3}$
Критический размер зародыша	$l_k$ , нм	–	0,391
Работа образования зародыша	$A_k$ , эВ	–	0,268
Теплота зародышеобразования	$Q_1$ , Дж	–	4,6
Теплота коагуляции	$Q_2$ , Дж	–	13,84
Теплота докристаллизации	$Q_3$ , Дж	–	205,32
Скорость теплоотвода при зародышеобразования	$u_1$ , Дж/с	–	0,023
Скорость теплоотвода при коагуляции	$u_2$ , Дж/с	–	13,84
Скорость теплоотвода при докристаллизации	$u_3$ , Дж/с	–	1,406

Теплота зародышеобразования  $Q_1$  рассчитывалась по формуле  $Q_1 = m\Delta H_{зар}$ , где  $\Delta H_{зар} = \Delta H_{LS}\Delta T^- / 2T_L$  – энтальпия зародышеобразования, Дж. Теплота  $Q_2$ , выделившаяся при коагуляции, показана ранее при расчете доли расплава, затвердевшего за время  $\tau_2$ , и определяется по формуле  $Q_2 = \beta m\Delta H_{LS}$ . В процессе затвердевания жидкой фазы как при КРК, так и при НРВК за время  $\tau_3$  выделяется теплота  $Q_3$ , вычисляемая по формуле  $Q_3 = \gamma m\Delta H_{LS}$ . Скорости тепловыделения  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  вычислялись по отношению  $u_1 = Q_1/\tau_1$ ,  $u_2 = Q_2/\tau_2$ ,  $u_3 = Q_3/\tau_3$ .

Из таблицы 2 видна существенная разница в параметрах кристаллизации типа КРК и НРВК. Так, например, если общее время (174 с) при равновесной кристаллизации было равно времени плавления, то при неравновесной кристаллизации общее время (350 с) было больше времени плавления и времени равновесной кристаллизации. Это указывает на весомую роль инкубационного периода (~203 с) в зародышеобразовании метастабильной области в интервале переохлаждений  $\Delta T^-$  до 20 К. Разница в параметрах кристаллизации связана с тем, что для КРК практически выпадает этап зародышеобразования и коагуляции. Тогда как для НРВК этот этап позволяет вводить целый спектр новых характеристик, необходимых для анализа кристаллизации переохлажденных расплавов и развития кластерно-коагуляционной модели.

## ВЫВОД

На примере термограмм плавления и кристаллизации висмута рассчитаны кинетические параметры квазиравновесной и неравновесно-взрывной кристаллизаций, существенно отличающихся для разных видов затвердевания при равных условиях эксперимента. Показано, что при неравновесно-взрывной кристаллизации существенную роль играют процессы зародышеобразования и коагуляции, меньшую – процессы изотермической докристаллизации. Таким образом, по термограммам плавкости, используя метод ЦТА, можно определить кинетические параметры кристаллизации,

которые, в свою очередь, будут использованы для получения кристаллов с наперед заданными свойствами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 83721 Україна, МПК (2006) G01N 25/02, G01N 25/20. Спосіб сумісного циклічного та диференційного термічного аналізу : № а200608831 : заявл. 07.08.2006 : опубл. 11.08.2008 / Александров В. Д., Фролова С. О., Постніков В. А., Прокоф'єв С. В. ; власник Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – Бюл. № 15. – 4 с. – Текст : непосредственный.
2. Вундерлих, Б. Физика макромолекул / Б. Вундерлих. – Москва : Мир. – 1979. – 574 с. – Текст : непосредственный.
3. Александров, В. Д. Термодинамика и кинетика кристаллизации легкоплавких металлов и сплавов / В. Д. Александров, С. А. Фролова. – Донецк : Издательство «Донбасс», 2020. – 351 с. – Текст : непосредственный.
4. Александров, В. Д. Метод расчета размеров зародышей при гомогенной кристаллизации из переохлажденной жидкости / В. Д. Александров, Е. А. Покингелица. – Текст : непосредственный // Журнал физической химии. – 2016. – Т. 90, № 9. – С. 1385–1388.
5. Александров, В. Д. Влияние термической предыстории расплава сурьмы на скачкообразный переход от равновесной кристаллизации к неравновесно-взрывной / В. Д. Александров. – Текст : непосредственный // Неорганические материалы. – 1992. – Т. 28, № 4. – С. 709–714.
6. Александров, В. Д. Влияние перегрева расплава галлия на его переохлаждение при кристаллизации / В. Д. Александров, С. А. Фролова. – Текст : непосредственный // Металлы. – 2014. – № 1. – С. 19–24.

Получена 13.01.2021

#### С. О. ФРОЛОВА, О. В. СОБОЛЬ, О. Ю. СОБОЛЕВ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІВНОВАЖНОЇ І НЕРІВНОВАЖНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВІСМУТУ ЗА ТЕРМОГРАМОЮ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** На основі термограм висмуту, отриманих при квазірівноважній (КРК) та нерівноважно-вибуховій (НРВК) кристалізації, досліджено процеси плавлення і кристалізації (при КРК); зародкоутворення, коагуляції та ізотермічної докристалізації (при НРВК). Знайдено термокінетичні параметри, визначені безпосередньо за кривими нагрівання-охолодження (час плавлення  $\tau_L^0$  і кристалізації  $\tau_S^0$ , швидкості нагрівання  $v_{\text{нагр}}$  і охолодження  $v_{\text{охол}}$  тощо), які були використані для розрахунку швидкості масової кристалізації  $U_S$ , температурної швидкості вибухової кристалізації  $\varpi$ , частки зародків у переохоложеному розплаві  $\alpha$ , частки  $\beta$  скоагульованого розплаву за час  $\tau_2$  тощо). Встановлено істотну різницю в параметрах кристалізації типу КРК і НРВК, пов'язану з тим, що для КРК практично випадає етап зародкоутворення і коагуляції.

**Ключові слова:** висмут, термічний аналіз, перегрів, кристалізація, переохолодження, зародкоутворення, час кристалізації, швидкість кристалізації.

#### SVETLANA FROLOVA, OKSANA SOBOLO, ALEKSANDR SOBOLEV DETERMINATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF EQUILIBRIUM AND NONEQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION OF BISMUTH FROM THERMOGRAMS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Based on the bismuth thermograms, obtained during quasi-equilibrium (QEC) and nonequilibrium-explosive (NEC) crystallizations, the processes of melting and crystallization (with QEC) were investigated; nucleation, coagulation and isothermal recrystallization (at NEC). Thermokinetic parameters determined directly from the heating-cooling curves (times of melting  $\tau_L^0$  and crystallization  $\tau_S^0$ , heating  $v_{\text{heat}}$  and cooling rates  $v_{\text{cool}}$ , etc.) were found, been used to calculate the rate of mass crystallization  $U_S$ , the temperature rate of explosive crystallization  $\varpi$ , the fraction of nuclei in a supercooled melt  $\alpha$ , fraction  $\beta$  of the coagulated melt during time  $\tau_2$ , etc.). A significant difference in the parameters of crystallization of the QEC and NEC type was established, associated with the fact that the stage of nucleation and coagulation practically disappears for QEC.

**Key words:** bismuth, thermal analysis, overheating, crystallization, supercooling, nucleation, crystallization time, crystallization rate.

**Фролова Светлана Александровна** – кандидат химических наук, доцент; заведующая кафедрой физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

**Соболев Оксана Викторовна** – кандидат химических наук, доцент физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

**Соболев Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

**Фролова Світлана Олександрівна** – кандидат хімічних наук, доцент; завідувач кафедри фізики і фізичного матеріалознавства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: аналіз фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

**Соболев Оксана Вікторівна** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри фізики і фізичного матеріалознавства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: аналіз фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

**Соболев Александр Юрійевич** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики і фізичного матеріалознавства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: аналіз фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

**Frolova Svetlana** – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor; Head of Physics and Physical Materials Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.

**Sobol Oksana** – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Physics and Physical Materials Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.

**Sobolev Aleksandr** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Physics and Physical Materials Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.

УДК 625.855.3

**В. Л. БЕСПАЛОВ, А. В. КУЗЬМИНЫХ, В. Л. МАКСЮЧЕНКО, С. Л. МАКСЮЧЕНКО, Д. Э. БЕЛИНСКИЙ**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АТМОСФЕРОСТОЙКОСТЬ КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОНОВ**

**Аннотация.** Асфальтобетон в дорожных покрытиях подвергается воздействию статических и динамических нагрузок от проходящего транспорта, влиянию погодных факторов и прежде всего в климатических условиях Донецкой Народной Республики и Российской Федерации, воздействию высоких температур, ультрафиолетовому, радиационному и инфракрасному облучению, действию кислорода воздуха, попеременному замораживанию-оттаиванию, длительному водонасыщению. В процессе производства, термостатирования в термос-бункерах, транспортирования к месту укладки в слой покрытия дорожной одежды и в условиях эксплуатации в покрытии нежесткой дорожной одежды автомобильной дороги бетонные смеси и бетон, приготовленные на органических вяжущих, подвергаются старению. Основными внешними факторами, определяющими необратимое изменение свойств асфальтобетонов является температура, проникающая радиация, ультрафиолетовый спектр солнца, кислород воздуха, влага, агрессивные химические вещества и др., а внутренними: структурно-реологический тип и консистенция нефтяного дорожного битума, химико-минералогический состав минеральных компонентов асфальтобетонов, тип гранулометрии, структура и текстура бетона [1–16]. Это приводит к тому, что срок службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог Донецкой Народной Республики составляет всего 5–7 лет вместо 12 до капитального ремонта.

**Ключевые слова:** асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой, срок службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, коэффициент теплового старения, коэффициент морозостойкости, коэффициент длительной водостойкости.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Получение атмосферостойких асфальтобетонов с комплексно-модифицированной структурой.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Расчетный срок службы покрытий асфальтобетонных дорог I-а и I-б технических категорий до капитального ремонта (10–12 лет) в Донецкой Народной Республике и в России не выдерживаются. После пяти лет эксплуатации они нуждаются в капитальном ремонте

В работах С. И. Гельфанд, А. С. Колбановской, Н. В. Михайлова, Ю. С. Рокаса, В. В. Бутовой, В. Д. Шестеркина, Г. С. Бахраха, Л. И. Базжина, Е. Т. Таращанского, Б. Т. Печеного, А. В. Руденского, В. И. Братчуна, [2–16] показано, что старение асфальтобетонных смесей и асфальтобетона на всех этапах технологической переработки и эксплуатации асфальтобетонного покрытия определяется прежде всего необратимыми изменениями свойств пленочного дорожного битума на поверхности минеральных материалов под действием активаторов старения – кислорода и температуры.

В условиях эксплуатации под действием температуры, кислорода воздуха, солнечной радиации, влаги и других факторов изменяется химический состав и структура пленочного битума [1–16]. Под действием движущегося транспорта происходит изменение текстуры асфальтобетона, связанное с перераспределением зерен минерального материала и битума, и частичным измельчением частиц щебня [5, 6]. Это приводит к перераспределению органического вяжущего в асфальтобетоне, уменьшению толщины его пленки на частицах минерального материала и увеличению жесткости асфальтобетонного покрытия.

Доминирующими причинами старения битума является его окислительная полимеризация и оксиполиконденсация, а также испарение углеводородов с молекулярной массой менее 400 [1, 3, 16].

© В. Л. Беспалов, А. В. Кузьминых, В. Л. Максюченко, С. Л. Максюченко, Д. Э. Белинский, 2021

При термоокислении и фотоокислении пленочного битума происходит образование высокомолекулярных продуктов высокой степени ароматичности в направлении масла → смолы → асфальтены.

Окислительные процессы происходят в битумах по схеме цепного механизма окисления Баха-Энглера. Под действием температуры, кислорода воздуха и солнечной радиации в смолах и асфальтенах образуются свободные радикалы. Углеводороды, реагируя с кислородом, образуют перекисные радикалы и гидроперекиси, дальнейшие превращения которых ведут к возникновению высокомолекулярных веществ смешанного характера с образованием твердых алкановых углеводородов и гетеросоединений. В результате появляются продукты более глубоких превращений – карбены и карбоиды [16].

Процессы необратимого изменения в битумах при старении происходят в три стадии [16]:

- образование коагуляционной сетки из асфальтенов и надмолекулярных образований смол;
- развитие жесткой пространственной сетки;
- разрушение жесткой пространственной сетки в результате напряжений усадки и действия транспортных средств.

Это ведет к возникновению микродефектов структуры асфальтобетона, росту его пористости, что способствует повышению скорости диффузии воды под пленку органического вяжущего (дипольный момент воды – 1,86 Д) и отслаивания ее от поверхности гидрофильных минеральных материалов. Воздействие транспортных нагрузок на асфальтобетонное покрытие в водонасыщенном состоянии резко снижает их прочность и долговечность. В порах насыщенного влагой асфальтобетона при движении транспортных средств возникают пульсирующие гидродинамические давления, усиливающие отслаивание битума от гидрофильной поверхности минеральных материалов и способствующие образованию трещин на асфальтобетонном покрытии.

Вода приводит к деградации битумов, так как способствует увеличению подвижности структурных элементов, снижает прочность межмолекулярных связей, вымывает водорастворимые соединения из нефтяного дорожного битума. Это облегчает развитие новых поверхностей и приводит к снижению прочности асфальтобетона. Основными факторами, определяющими длительную водостойкость асфальтобетонного покрытия являются: структура и характер порового пространства асфальтобетона; вязкость, состав и структурнореологический тип битума; адгезия органического вяжущего к поверхности минеральных частиц, химико-минералогический состав минерального порошка и способность компонентов органических вяжущих образовывать хемосорбционные связи на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал».

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения исследований оптимальных составов асфальтополимербетонов повышенной атмосферостойкости с поверхностно-активированными минеральными материалами олигомерами и полимерами и нефтяным дорожным битумом, модифицированным бутадиенметилстирольным каучуком совместно с технической серой приняты следующие материалы:

- нефтяные дорожные битумы (таблица 1);

Таблица 1 – Показатели качества нефтяных дорожных битумов

Наименование показателя	Ед. изм.	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130	БНД 130/200
Пенетрация при температуре 25 °С	0,1 мм	59	75	112	151
Температура размягчения по «КиШ»	°С	54	53	45	37
Растяжимость при температуре 0 °С	см	>50	>50	>50	>50
25 °С		>100	>100	>100	>100
Температура хрупкости	°С	-17	-18	-18	-20
Коэффициент сцепления со стеклом	%	28	24	22	18
Интервал пластичности (ИП)	–	71	71	63	57
Структурно-реологический тип	–	III (золь-гель)	III (золь-гель)	III (золь-гель)	III (золь-гель)

– каучук синтетический бутадиенметилстирольный СКМС-30 АРКМ-15 ГОСТ 11138-78 : жесткость по Д 7,2 Н; эластическое восстановление 3,0; вязкость по Муни МБ1 + 4 (100 °С) – 48; условная

прочность при растяжении – 25 МПа; относительное удлинение при разрыве – 600 %; эластичность по отскоку – 27,9 %; массовая доля золы – 0,2 %; массовая доля связанного альфаметилстирола – 24 %; – щебень и искусственный песок получены дроблением и рассевом гранита со следующими показателями качества: дробимость – 6,2 % (марка щебня по прочности – 1 400); истираемость щебня в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность щебня – 1 410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2 670 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость, F > 200 циклов; содержание зерен лещадной и игольчатой формы – 6,5 %.

Гранулометрический состав минеральной части, принятых асфальтобетонов, представлен полными остатками на соответствующих ситах (мм). Тип «Б» (состав проф. В. А. Золотарева): 15...10 – 22,8%; 10...5 – 17,2%; 5...2,5 – 17,2%; 2,5...1,25 – 12,8%; 1,25...0,63 – 8,3%; 0,630...0,315 – 6,5%; 0,315...0,140 – 4,8%; 0,140...0,071 – 3,2%; минеральный порошок – 7,2 %.

Использован известняковый минеральный порошок (МП): содержание CaCO<sub>3</sub> – 92 %; удельная поверхность S<sub>1,2</sub> = 400 м<sup>2</sup>/кг; плотность – 2 715 кг/м<sup>3</sup>; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа – 1 880 кг/м<sup>3</sup>; пустотность – 31,8 %; битумоемкость – 50 %. Минеральный порошок поверхностно активировали бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 из раствора в бензине.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения показателей качества БПВ и асфальтополимербетонов с комплексно-модифицированной микроструктурой использованы стандартные методы исследований по ГОСТ 8267-93, ГОСТ Р 52129-2003, ГОСТ 11501-78, ГОСТ 11505-75, ГОСТ 11506-73, ГОСТ 12801-98, ДСТУ Б.В.2.7-81-98, ГОСТ Р 52128-2003, ГОСТ 22245-90, ГОСТ 9128-2013, СТБ 1033-2004 и др., и ряд специальных методов.

## МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ БИТУМОПОЛИМЕРСЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ

Приготовление битумополимерсерного вяжущего выполнялось по аналогичной схеме. После растворения в углеводородах 2 % мас. каучука СКМС-30 его вводили в разогретый до температуры 150...155 °С нефтяной дорожный битум БНД 60/90, помещенный в лабораторную мешалку. В течение 60 минут осуществлялось перемешивание БПВ, после чего мешалка останавливалась, вводилась техническая сера 30 % мас. и продолжалось перемешивание в течение 30 минут.

В настоящей работе проверялась устойчивость мелкозернистого асфальтополимерсеробетона (тип Б) в климатической камере ИП-1 на тепловое старение. Температура прогрева составляла 75 °С. Образцы подвергались также ультрафиолетовому облучению. В качестве показателя, характеризующего изменение свойств асфальтобетонов, принят коэффициент старения,  $K_{ст} = R_{20,\tau} / R_{20,0}$  (где R<sub>20,τ</sub> и R<sub>20,0</sub> предел прочности при сжатии при 20 °С асфальтобетонов прогретых при 75 °С в течение τ и 0 времени соответственно) – рисунок 2.

Асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой должен иметь повышенные деформативную и динамическую устойчивость в области низких эксплуатационных температур, прочность и сдвигустойчивость – при положительных. На рисунке 1 приведена блок-схема получения модифицированных асфальтобетонных смесей с повышенными технологическими свойствами и модифицированных асфальтобетонов повышенной долговечности.

Долговечность асфальтобетонов во многом определяется свойствами нефтяных дорожных битумов, а также химико-минералогическим составом и структурой минерального порошка. В связи с тем, что органическое вяжущее в асфальтобетоне находится в структурированном состоянии, то целесообразно поведение комплексно-модифицированной микроструктуры асфальтополимерсеробетона под действием факторов, которые обуславливают их старение, исследовать непосредственно в бетоне с учетом взаимодействия вяжущих с минеральными материалами.

Необходимо отметить, что до настоящего времени отсутствуют удовлетворительные методы изучения старения бетонов на органических вяжущих, которые бы моделировали условия их эксплуатации в натуральных условиях.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные по изменению коэффициента старения в зависимости от времени прогрева показывают (рисунок 2), что на начальном этапе прогрева (600 часов) происходит более интенсивное старение как горячего асфальтобетона, так и асфальтополимерсеробетона. Это можно объяснить испарением легких углеводородов масел битума и диффузией их в поры и капилляры известнякового минерального порошка в горячем асфальтобетоне. Затем темп нарастания прочности остается постоянным



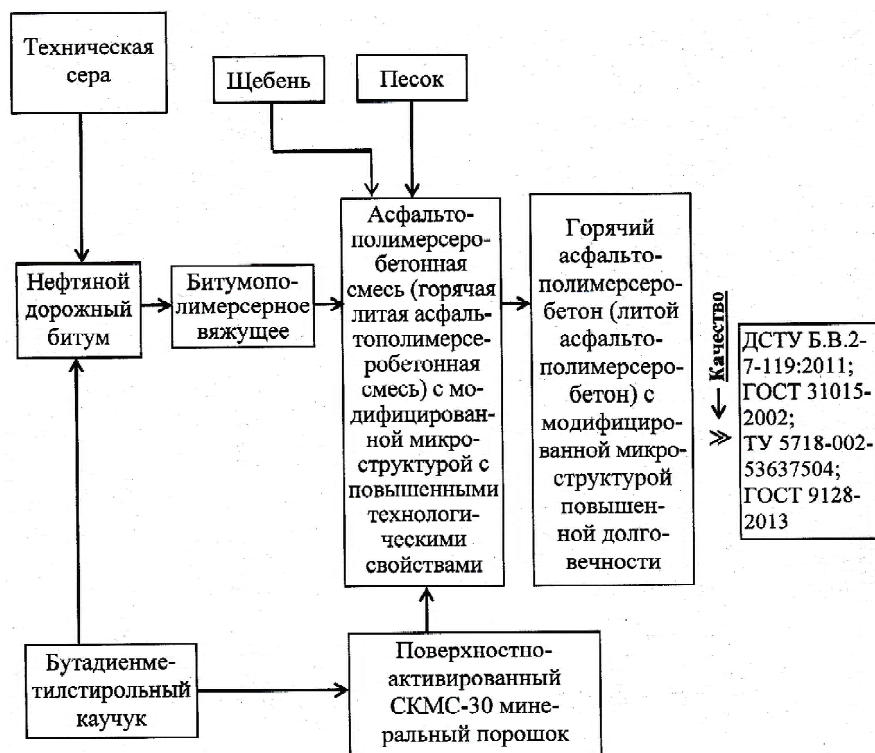


Рисунок 1 – Блок-схема получения горячей (литой) асфальто-полимерсеробетонной смеси с комплексно-модифицированной микроструктурой.

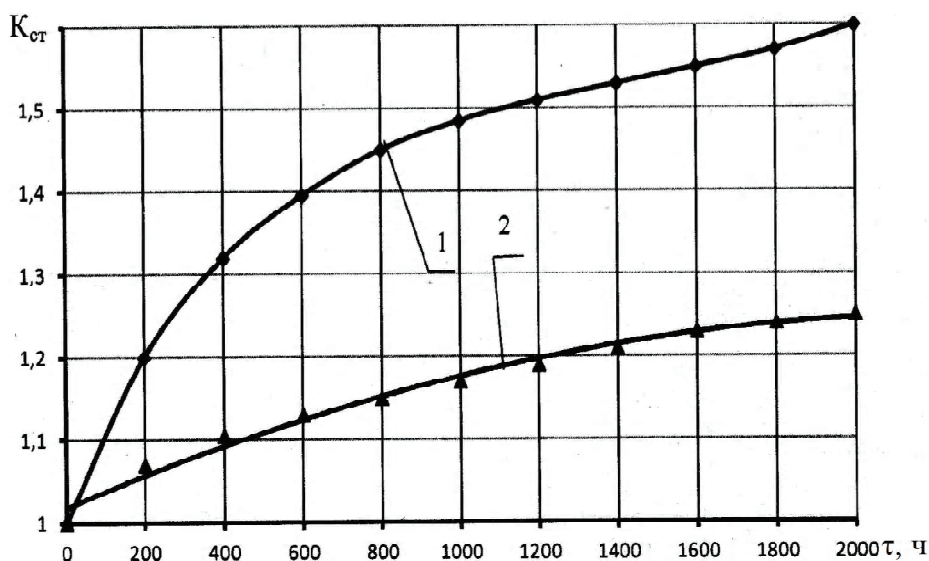


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплового старения,  $K_{ст}$  от времени прогрева,  $\tau$  в климатической камере ИП при температуре 75 °С мелкозернистого асфальтового бетона (тип Б), отличающегося составом асфальтвяжущего вещества: 1 – вяжущее – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 59 \cdot 0,1$  мм, минеральный порошок известняковый неактивирован; 2 – вяжущее – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 59 \cdot 0,1$  мм модифицирован 2 % мас. СКМС-30 и 30 % мас. технической серы, минеральный порошок поверхностно-активирован 0,5 % мас. СКМС-30.

для асфальтобетона и стабилизируется для асфальтополимерсеробетона. Причем коэффициент старения асфальтополимерсеробетона после 2 000 часов прогрева при температуре 75 °С не превышает критического значения [1, 3 5]. В то же время горячий асфальтобетон достигает этого значения через 350 часов прогрева.

В этом случае срок службы асфальтобетонного покрытия можно продлить, если своевременно устраивать и возобновлять слои поверхностной обработки. Это позволит значительно замедлить испарение легкокипящих фракций масляной среды нефтяного битума и ограничить диффузию кислорода воздуха к полимеризующимся компонентам органического вяжущего.

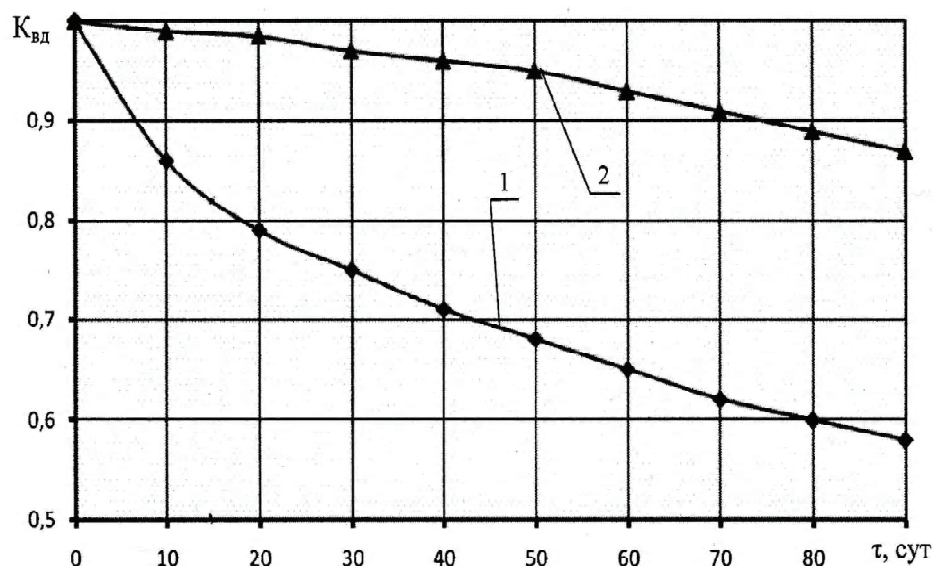
Таким образом, асфальтополимерсеробетоны более стабильны, чем традиционные горячие асфальтобетоны в условиях действия высокой температуры и ультрафиолетового облучения. Это обусловлено тем, что макромолекулы, надмолекулярные образования СКМС-30 и частицы технической серы сорбируют большую часть низкомолекулярных углеводородов битума, тем самым замедляя интенсивность испарения алкановых углеводородов с температурой кипения до 300 °С, избирательной диффузии их внутрь минеральных зерен; снижения интенсивности окисления кислородом воздуха ненасыщенных соединений битума вследствие меньшего его проникновения сквозь пленку вяжущего, плотность и когезионная прочность которой значительно выше битумной; увеличивая энергию активации реакций поликонденсации групп веществ битума в направлении масла – смолы – асфальтены.

Важнейшим свойством асфальтобетона, предопределяющим его долговечность, является устойчивость его структуры в условиях изменяющегося влажного и температурного режима, что характерно для условий эксплуатации в ДНР, Российской Федерации, Украине.

Длительное увлажнение асфальтобетона способствует отслаиванию битумных пленок, особенно при недостаточной адгезии их к поверхности минеральных частиц, что приводит к ослаблению структурных связей в бетоне и облегчает его разрушение под действием транспортных средств.

Определение водостойкости осуществляли в условиях длительного водонасыщения. Образцы насыщали водой в условиях вакуума, затем помещали в сосуды с водой, температура которой поддерживалась в пределах 20 °С. Водостойкость асфальтобетона характеризовалась как отношение показателя прочности материала, водонасыщенного в течение 15–90 суток, к показателю прочности образцов до водонасыщения.

Данные по изменению коэффициента водостойкости при длительном водонасыщении (рис. 3) показывают, что на начальном этапе водонасыщения 30 суток происходит резкое падение прочности горячего асфальтобетона. Затем темп падения прочности замедляется. В то же время коэффициент водостойкости асфальтополимерсеробетона до 75 суток водонасыщения более 0,9, а после 90 суток водонасыщения  $K_{вд} = 0,87$ . Следовательно, асфальтополимерсеробетонные покрытия автомобильных дорог в условиях длительного водонасыщения должны быть значительно долговечнее, чем покрытия из традиционных горячих асфальтобетонных смесей.



**Рисунок 3** – Зависимость коэффициента длительной водостойкости  $K_{вд}$  от времени водонасыщения  $\tau$  мелкозернистого асфальтобетона (тип Б), отличающегося составом асфальтовяжущего вещества: 1 – вяжущее – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 59 \cdot 0,1$  мм, минеральный порошок известняковый неактивирован; 2 – вяжущее – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 59 \cdot 0,1$  мм модифицирован 2 % мас. СКМС-30 и 30 % мас. технической серы, минеральный порошок поверхностно-активирован 0,5 % мас. СКМС-30.

## ВЫВОДЫ

Комплексно-модифицированные асфальтополимербетоны характеризуются повышенной плотностью, длительной водостойкостью ( $K_{\text{вд}} > 0,96$ ), пределом прочности при  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$   $R_{50} = 1,7...2,3$  МПа, коэффициентом теплового старения после 2 000 часов прогрева в климатической камере ИП-1 при  $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ультрафиолетовом облучении  $K_{\text{ст}} = 1,2...1,3$  против 1,6 для традиционных горячих асфальтобетонов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфанд, С. И. Устойчивость асфальтобетона в зависимости от климатических факторов / С. И. Гельфанд. – Москва : Автотрансиздат, 1957. – 16 с. – Текст : непосредственный.
2. Рокас, Ю. С. Проблемы и пути повышения долговечности дорожных одежд / Ю. С. Рокас. – Вильнюс : ЛитНИИ-ИНТИ, Бел НИИТИ, 1979. – 52 с. – Текст : непосредственный.
3. Бутова, В. В. Исследование старения горячего и теплого асфальтобетона : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бутова Вера Васильевна ; Харьковский автомобильно-дорожный институт. – Харьков, 1971. – 18 с. – Текст : непосредственный.
4. Шестеркин, В. Д. Определение периода нормальной работы асфальтобетонного покрытия / В. Д. Шестеркин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1973. – № 8. – С. 133–136.
5. Бахрах, Г. С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его замедления / Г. С. Бахрах. – Текст : непосредственный // Труды ГипродорНИИ. – 1974. – Вып. 9. – С. 84–96.
6. Базжин, Л. И. Исследование влияния минералогического состава и структуры минеральных порошков на старение асфальтового бетона : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Базжин Лев Иванович. – Харьков : ХАДИ, 1974. – 24 с. – Текст : непосредственный.
7. Шестеркин, В. Д. Роль полимеризационных процессов битума в старении асфальтобетонных дорожных покрытий. – Текст : непосредственный / В. Д. Шестеркин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1976. – № 7. – С. 129–133.
8. Печеный, Б. Г. Исследование механизма старения битумов в эксплуатационных условиях / Б. Г. Печеный, Л. А. Ахметова. – Текст : непосредственный // Труды БашНИИ НП. – 1976. – № 5. – С. 96–100.
9. Печеный, Б. Г. Долговечность битумных и битумо-минеральных покрытий / Б. Г. Печеный. – Москва : Стройиздат, 1981. – 134 с. – Текст : непосредственный.
10. Таращанский, Е. Г. Учитывать изменение свойств асфальтобетонов во времени / Е. Г. Таращанский, В. Д. Голдина. – Текст : непосредственный // Автомобильные дороги. – 1983. – № 6. – С. 14–15.
11. Руденский, А. В. Определение расчетных значений модуля упругости асфальтобетона по результатам экспериментального определения фактических значений модуля упругости / А. В. Руденский. – Текст : непосредственный // Дороги и мосты. – 2010. – № 23. – С. 222–227.
12. Руденская, И. М. Состав, структура и физико-механические свойства нефтяных дорожных битумов / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – Текст : непосредственный // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2017. – Вып. 79. – С. 17–21.
13. Братчун, В. И. О некоторых закономерностях старения бетонных смесей и бетонов на органических вяжущих на примере дегтебетонов / В. И. Братчун, Д. В. Гуляк, В. Л. Беспалов. – Текст : непосредственный // Вісник Харківського автомобільно-дорожного університету. – 2008. – Вып. 40. – С. 59–64.
14. Братчун, В. И. О факторах и этапах старения дегтебетонных смесей и дорожных дегтебетонов / В. И. Братчун, Д. В. Гуляк, В. Л. Беспалов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы строительства. – 2009. – № 7. – С. 179–185.
15. Особенности реологического поведения состаренных битумов / В. И. Братчун, М. К. Пактер, А. А. Стукалов, В. Л. Беспалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – № 1(99) Сучасні будівельні матеріали. – С. 84–92.
16. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – Москва : Транспорт, 1973. – 264 с. – Текст : непосредственный.

Получено 14.12.2020

В. Л. БЕСПАЛОВ, А. В. КУЗЬМИНИХ, В. Л. МАКСЮЧЕНКО,  
С. Л. МАКСЮЧЕНКО, Д. Е. БЕЛІНСЬКИЙ  
АТМОСФЕРОСТІЙКІСТЬ КОМПЛЕКСНО-МОДИФІКОВАНИХ АСФАЛЬТО-  
ПОЛІМЕРБЕТОНІВ  
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Асфальтобетон в дорожніх покриттях піддається впливу статичних і динамічних навантажень від транспорту, що рухається, впливу погодних факторів і, перш за все в кліматичних умовах Донецької Народної Республіки і Російської Федерації, впливу високих температур, ультрафіолетовому, радіаційному та інфрачервоному опроміненню, дії кисню повітря, поперемінному заморожуванню-відтаванню, тривалому водонасиченню. У процесі виробництва, термостатування в термос бункерах, транспортування до місця укладання в шари покриття дорожнього одягу і в умовах експлуатації в покритті нежорсткого дорожнього одягу автомобільної дороги бетонні суміші і бетон, приготовані на органічних в'язучих, піддаються старінню. Основними зовнішніми факторами, що визначають зворотні зміни властивостей асфальтобетонів, є температура, проникаюча радіація, ультрафіолетовий спектр сонця, кисень повітря, волога, агресивні хімічні речовини та ін. А внутрішніми: структурно-реологічний тип і консистенція нафтового дорожнього бітуму, хіміко-мінералогічний склад мінеральних компонентів асфальтобетонів, тип гранулометрії, структура і текстура бетону [1–16]. Це призводить до того, що термін служби асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг Донецької Народної Республіки складає всього 5–7 років замість 12 до капітального ремонту.

**Ключові слова:** асфальтобетон з комплексно-модифікованою структурою, термін служби асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг, коефіцієнт теплового старіння, коефіцієнт морозостійкості, коефіцієнт тривалої водостійкості.

VITALY BESPALOV, ANDREI KUZMINYKH, VLADISLAV MAKSYUCHENKO,  
STANISLAV MAKSYUCHENKO, DEMYAN BELINSKY  
WEATHER RESISTANCE OF COMPLEX-MODIFIED ASPHALT-POLYMER  
CONCRETES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Asphalt concrete in road surfaces is exposed to static and dynamic loads from passing vehicles, the influence of weather factors and, above all, in the climatic conditions of the Donetsk People's Republic and the Russian Federation, high temperatures, ultraviolet, radiation and infrared irradiation, the action of air oxygen, alternate freezing. thawing, long-term water saturation. In the process of production, thermostating in thermal bins, transportation to the place of laying in pavement layers and under operating conditions in the pavement of a non-rigid road pavement, concrete mixtures and concrete prepared on organic binders are subject to aging. The main external factors that determine the irreversible change in the properties of asphalt concrete are temperature, penetrating radiation, ultraviolet spectrum of the sun, air oxygen, moisture, aggressive chemicals, etc., and internal factors: the structural-rheological type and consistency of oil road bitumen, chemical and mineralogical composition of mineral components asphalt concrete, type of granulometry, structure and texture of concrete [1–16]. This leads to the fact that the service life of the asphalt concrete pavements of the highways of the Donetsk People's Republic is only 5–7 years instead of 12 before major repairs.

**Key words:** asphalt concrete with a complex-modified structure, service life of asphalt concrete pavements of highways, thermal aging coefficient, frost resistance coefficient, long-term water resistance coefficient.

**Беспалов Виталий Леонидович** – доктор технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев жестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Кузьминых Андрей Владимирович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Максюченко Владислав Леонидович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Максюченко Станислав Леонидович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Белинский Демьян Эдуардович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Беспалов Віталій Леонідович** – доктор технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, які використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Кузьминых Андрій Володимирович** – магистрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Максюченко Владислав Леонідович** – магистрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Максюченко Станіслав Леонідович** – магистрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Белінський Дем'ян Едуардович** – магистрант кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка ефективних технологій переробки техногенної сировини в компоненти композиційних матеріалів.

**Bespalov Vitaly** – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic astringent for a production road-build materials of compositions, used for building of structural layers of non-rigid travelling clothes of highways of the promoted longevity.

**Kuzminykh Andrei** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies for processing man-made materials in the components of the composite materials.

**Maksyuchenko Vladislav** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies for processing man-made materials in the components of the composite materials.

**Maksyuchenko Stanislav** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies for processing man-made materials in the components of the composite materials.

**Belinsky Demyan** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of effective technologies for processing man-made materials in the components of the composite materials.

УДК 625.855.3

**В. Л. БЕСПАЛОВ, О. В. БЛЕДНОВ, А. С. ДЗЮБА, В. Ю. КИЧИГИН, В. В. ФИЩУК, И. Н. ШКОДА**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО КУБОВОГО ОСТАТКА ФЕНОЛЬНО-АЦЕТОНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Аннотация.** Дорожное строительство является одним из крупнейших потребителей строительных материалов, стоимость которых составляет более половины стоимости строительства [1, 2]. Для обеспечения ускоренного развития сети автомобильных дорог, увеличения масштабов реконструкции и ремонта существующих дорог возникает необходимость в увеличении производства дорожно-строительных материалов, улучшения их качества, создания специальных видов строительных материалов при максимальном использовании местных материалов и побочных продуктов промышленности, в том числе широкого применения вторичных кубовых остатков фенольно-ацетонового производства (ВКОФАП). В работе [3] показано, что эффективным способом улучшения свойств ВКОФАП является модификация их отсевом поливинилхлорида из раствора в антраценовом масле. В то же время сведения о составе и термических характеристиках ВКОФАП, а также о процессах взаимодействия в модифицированном композиционном органическом вяжущем являются неизученными.

**Ключевые слова:** вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства, поливинилхлорид, нефтяной дорожный битум, компаундированное органическое вяжущее, планирование эксперимента.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства (ВКОФАП) – побочный многотонажный продукт производства фенола кумольным методом, содержит более 50 % продуктов осмоления и конденсации. Они могут быть сконцентрированы в виде кубового остатка (КО) после выделения более лёгких компонентов ректификацией ( $\alpha$ -метилстирол, фенол, ацетофенон).

В связи с отсутствием квалифицированного применения кубового остатка и с учётом его полимерной природы представлялось целесообразным использование кубового остатка в качестве вяжущего для производства органоминеральных смесей, пригодных в строительстве конструктивных слоёв нежестких дорожных одежд автомобильных дорог.

Однако непосредственно для этих целей кубовый остаток не может быть использован в связи с низкой вязкостью ( $C_{30}^{10}=10$  с) и низкой когезией.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Совершенствование структуры вторичного кубового остатка фенольно-ацетонового производства модифицированием первичного отхода производства поливинилхлорида – отсевом.

Для радикального совершенствования структуры вторичного кубового остатка фенольно-ацетонового производства его необходимо модифицировать веществами, которые снижают ассоциативную способность компонентов ВКОФАП, формируют пространственную полимерную сетку с гибкими цепями между узлами сетки и обеспечивают создание непрерывного спектра молекулярно-массового распределения веществ.

В частности, совмещение ВКОФАП с нефтяным дорожным битумом марки БНД 90/130 приводит к значительному снижению температурной чувствительности механических свойств мелкозернистого бетона (тип В).

© В. Л. Беспалов, О. В. Бледнов, А. С. Дзюба, В. Ю. Кичигин, В. В. Фищук, И. Н. Шкода, 2021

Компаундированное вяжущее состава 80 % ВКОВАП и 20 % битума БНД 90/130 (система 6 таблица) обеспечивает необходимые механические свойства бетона при устройстве из него верхнего слоя нежесткой автомобильной дороги.

**Таблица** – Механические свойства мелкозернистого бетона на компаундированном органическом вяжущем

№ п/п	Состав компаундированного вяжущего / содержание вяжущего в бетонной смеси	R <sub>0</sub> , МПа	R <sub>20</sub> , МПа	R <sub>50</sub> , МПа
1	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 100 % / 7,7 %	28,28	5,84	1,04
2	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 90 % – битум 10 % / 7,7 %	23,40	4,24	0,79
3	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 80 % – битум 20 % / 7,0 %	21,56	4,67	0,86
4	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 60 % – битум 40 % / 6,5 %	19,07	6,67	0,95
5	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 40 % – битум 60 % / 6,0 %	14,12	6,63	1,12
6	Вторичный кубовый остаток фенольно-ацетонового производства 20 % – битум 80 % / 6,0 %	7,71	5,57	1,00
7	Битум – 100 % / 6,0 %	5,92	3,13	0,95

где R<sub>0</sub>, R<sub>20</sub>, R<sub>50</sub> – предел прочности при сжатии при 0 °С 20 °С и 50 °С соответственно.

Изучение термических свойств систем, [3], свидетельствует о том, что вторичный кубовый остаток фенольной смолы является термостабильным материалом в интервале температур 100...150 °С (температуры технологической переработки дёгтебетонных смесей). Зависимость потери массы ВКОФАП от температуры имеет два ярко выраженных участка: от 200 до 320 °С (медленная потеря 14 % массы образца) и от 320 до 450 °С (быстрая потеря массы системы 44 %).

Модификация же ВКОФАП двухпроцентным раствором отсева поливинилхлорида в антраценовом масле приводит к тому, что, уже начиная с температуры 200 °С, происходит интенсивная деструкция модифицированного отсева ПВХ ВКОФАП. При этом потеря массы системы 3 (рис. 2) при температуре 400 °С достигает 80 %. Деструктируют как ароматические вещества, так и алифатические радикалы и кислородсодержащие функциональные группы.

Таким образом, эффективным способом модификации ВКОФАП является введение в его состав раствора отсева поливинилхлорида в антраценовом масле, а также использование его в составе компаундированного вяжущего в смеси с нефтяным дорожным битумом.

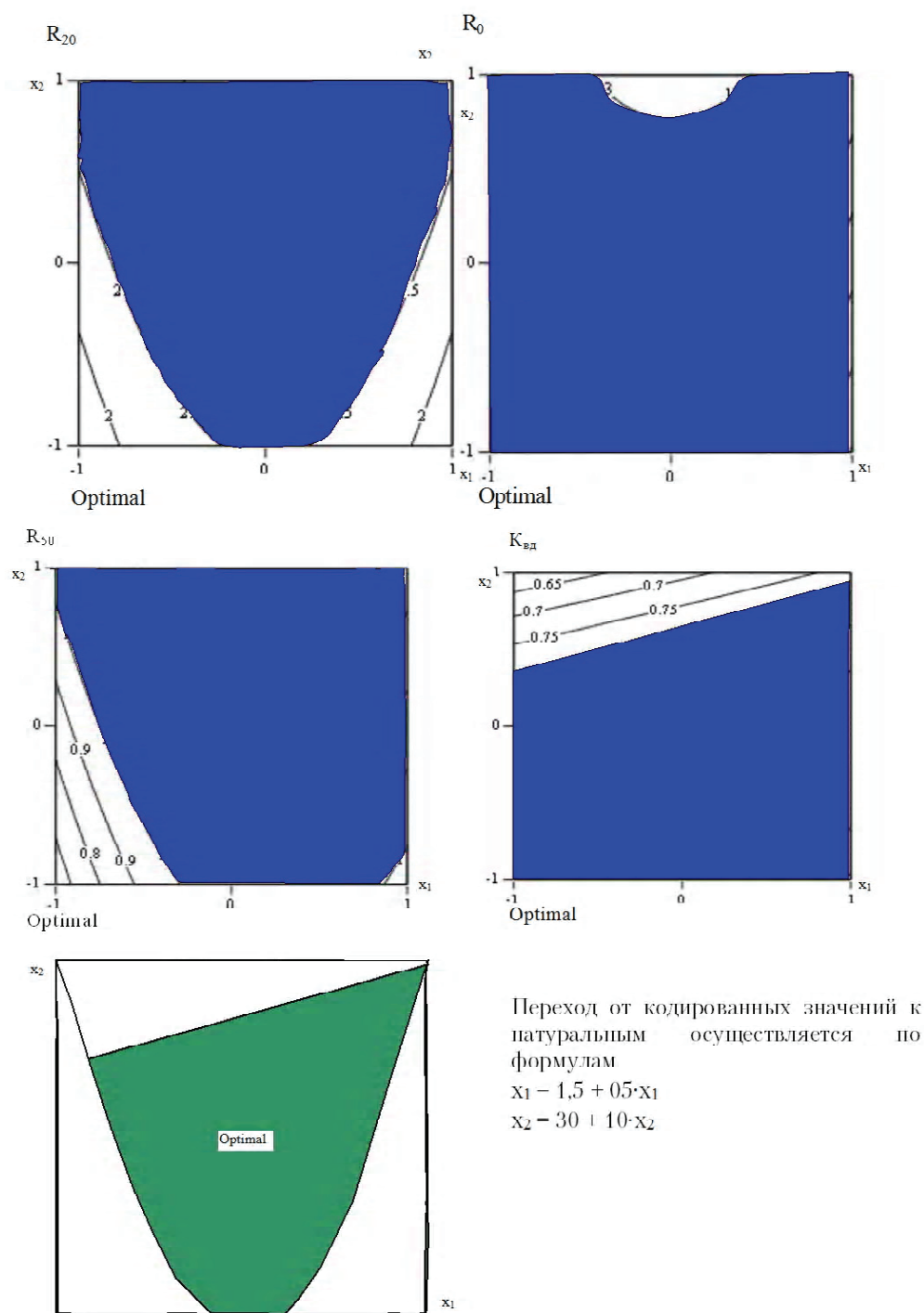
Для загущения и структурирования кубовый остаток модифицировали комплексной добавкой, представленной отсева суспензионного поливинилхлорида ПВХ (О/ПВХ) и полимерным остатком производства фталевого ангидрида (П/ФА). В связи с тем, что совокупность факторов, действующих на оптимизируемую систему, является достаточно сложной, был применён метод, планирования эксперимента, позволяющий оптимизировать составы вяжущих, обеспечивающих требуемые их физико-механические свойства. Был использован полный двухфакторный эксперимент с уровнями варьирования –1; 0; 1. Подобран оптимальный состав вяжущего, которому отвечала развитая сопряженная структура в системе КО – О/ПВХ – П/ФА.

Характер термограммы модифицированного вяжущего свидетельствует о полном совмещении системы. Имеются незначительные температурные переходы, которые отражают влияние модификаторов (О/ПВХ и П/ФА, соответственно).

О характере структурных изменений при модификации КО судили по данным реологических исследований (пластовискозиметр ПВР – 2) и молекулярной релаксации (метод микрокалориметрии).

Оптимальной структуре вяжущего соответствовало наличие ярко выраженной аномалии вязкости и появление предела сдвиговой прочности на кривых выхода напряжений с предстационарной стадии деформирования на стационарную в условиях непрерывного сдвигового деформирования.

Это свидетельствует о повышении уровня межмолекулярного взаимодействия в модифицированной системе. Сопоставление термических характеристик исходного КО и модифицированного



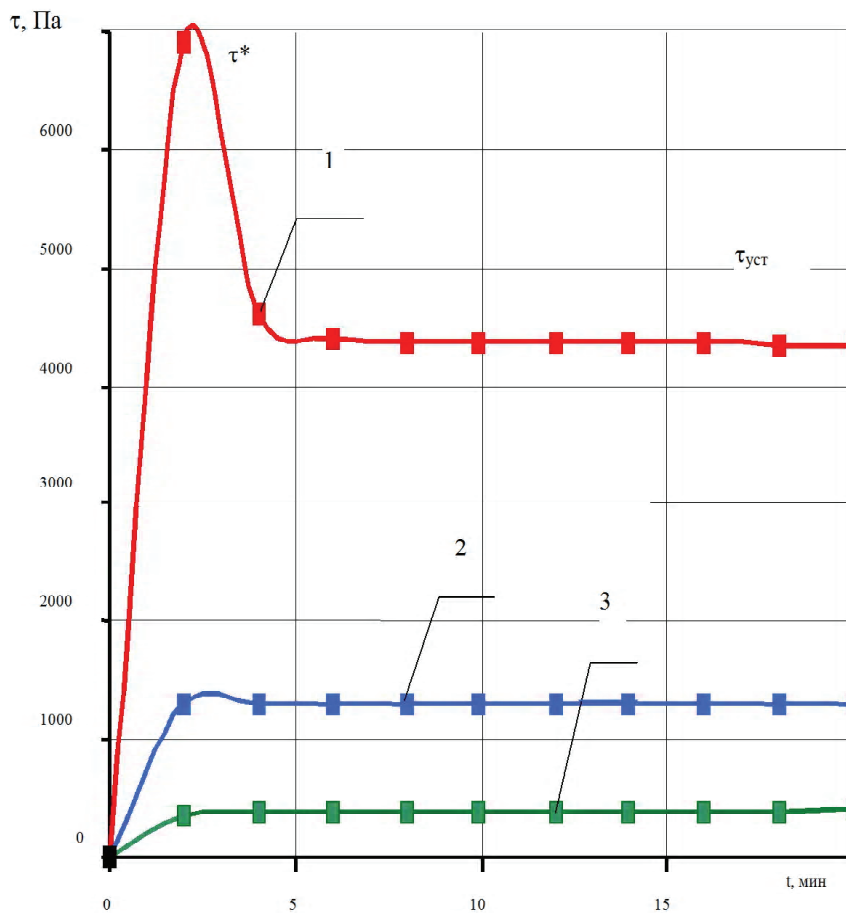
**Рисунок 1** – Зависимость предела прочности при сжатии при 20 °С ( $R_{20}$ ), при 0 °С ( $R_0$ ), при 50 °С ( $R_{50}$ ) и коэффициента водостойкости ( $K_{вд}$ ), а также область оптимальных составов (Опт) при фиксированных значениях факторов  $x_1$  – концентрация О/ПВХ и  $x_2$  – концентрация П/ФА.

комплексной добавкой свидетельствует о том, что в области температур до 400 °С относительная потеря массы модифицированного комплексной добавкой КО на 11 % ниже, чем не модифицированного КО.

## ВЫВОДЫ

С использованием экспериментально-статистического моделирования определены области оптимальных составов комплексных каменноугольных вяжущих: вязкопластичный ВКОФАП – 100 м.ч.,





**Рисунок 2** – Кинетика выхода напряжений  $\tau$  на установившийся режим течения при скоростях сдвига: 1 –  $\dot{\gamma} = 1,5912 \text{ c}^{-1}$ ; 2 –  $\dot{\gamma} = 0,31824 \text{ c}^{-1}$ ; 3 –  $\dot{\gamma} = 0,1326 \text{ c}^{-1}$  и температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

отсев поливинилхлорида 1,25...1,75 м.ч., кубовые остатки очистки дистилляции фталевого ангидрида 25...35 м.ч. При данном концентрационном соотношении компонентов в комплексном органическом вяжущем формируется сопряженная пространственная структура, состоящая из узлов ОДФА, связанных между собой через адсорбционно-сольватные прослойки пластифицированного поливинилхлорида. Об этом свидетельствует появление предела сдвиговой прочности и аномалии вязкости в комплексном органическом вяжущем при исследовании его методом ротационной вискозиметрии. Модифицированный вязкопластичный ВКОФАП характеризуется следующими показателями качества:  $\Pi_0 = 255 \text{ град.}$ ,  $\Pi_{25} = 102 \text{ град.}$ ,  $T_p = 46,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{xp} = -10,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_{25} = 0,69 \text{ м.}$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожно-строительные материалы : учебник для вузов / И. М. Грушко, И. В. Королёв, И. М. Борщ, Г. М. Мищенко. – Москва : Транспорт, 1983. – 383 с. – Текст : непосредственный.
2. Рокас, С. Ю. Проблемы и пути повышения долговечности дорожных одежд : учебник / С. Ю. Рокас. – Вильнюс : ЛитНИИТИ, 1979. – 52 с. – Текст : непосредственный.
3. Беспалов, В. Л. Композиционное органическое вяжущее на основе вторичного кубового остатка фенольно-ацетонового производства / В. Л. Беспалов. – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – 1999. – Выпуск № 2(16). – С. 109–112.
4. Брон, Я. А. Переработка каменноугольной смолы : учебник / Я. А. Брон. – Москва : Metallurgizdat. – 1963. – 272 с. – Текст : непосредственный.
5. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – Москва : Транспорт, 1973. – 261 с. – Текст : непосредственный.

Получено 15.01.2021

В. Л. БЕСПАЛОВ, О. В. БЛЕДНОВ, О. С. ДЗЮБА, В. Ю. КИЧИГИН,  
В. В. ФИЩУК, І. М. ШКОДА  
МОДИФІКОВАНІ ОРГАНІЧНІ В'ЯЖУЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ВТОРИННОГО КУБОВОГО ЗАЛИШКУ ФЕНОЛЬНО-АЦЕТОНОВОГО  
ВИРОБНИЦТВА  
ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Дорожнє будівництво є одним з найбільших споживачів будівельних матеріалів, вартість яких становить більше половини вартості будівництва [1, 2]. Для забезпечення прискореного розвитку мережі автомобільних доріг, збільшення масштабів реконструкції та ремонту існуючих доріг виникає необхідність у збільшенні виробництва дорожньо-будівельних матеріалів, поліпшення їх якості, створення спеціальних видів будівельних матеріалів при максимальному використанні місцевих матеріалів і побічних продуктів промисловості, у тому числі широкого застосування вторинних кубових залишків фенольно-ацетонового виробництва (ВКОФАП). У роботі [3] показано, що ефективним способом поліпшення властивостей ВКОФАП є модифікація їх відсівом полівінілхлориду з розчину в антраценовому маслі. Водночас відомості про склад і термічні характеристики ВКОФАП, а також про процеси взаємодії в модифікованому композиційному органічному в'язучому є невивченими.

**Ключові слова:** вторинний кубовий залишок фенольно-ацетонового виробництва, полівінілхлорид, нафтовий дорожній бітум, компаундоване органічне в'язуче, планування експерименту.

VITALY BESPALOV, OLEG BLEDNOV, ALEXANDER DZUBA, VLADISLAV  
KICHIGIN, VLADISLAV FISHCHUK, IGOR SKODA  
MODIFIED ORGANIC BINDERS WITH THE USE OF SECONDARY CUBIC  
RESIDUE OF PHENOLIC-ACETONE PRODUCTION  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Road construction is one of the largest consumers of building materials, the cost of which is more than half of the cost of construction [1, 2]. To ensure the accelerated development of the road network, increase the scale of reconstruction and repair of existing roads, there is a need to increase the production of road construction materials, improve their quality, create special types of building materials with the maximum use of local materials and by-products of industry, including among the widespread use of secondary bottoms of phenol-acetone production (VKOFAP). It was shown in [3] that an effective way to improve the properties of VKOFAP is to modify them by screening polyvinyl chloride from a solution in anthracene oil. At the same time, information about the composition and thermal characteristics of VKOFAP, as well as about the interaction processes in the modified composite organic binder, are not studied.

**Key words:** secondary bottoms of phenol-acetone production, polyvinyl chloride, oil road bitumen, compounded organic binder, experiment planning.

**Беспалов Виталий Леонидович** – доктор технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Бледнов Олег Витальевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Дзюба Александр Сергеевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: использование техногенного сырья в дорожном строительстве.

**Кичигин Владислав Юрьевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицирования органических вяжущих.

**Фищук Владислав Васильович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Шкода Игорь Николаевич** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: синтез органических вяжущих для производства композиционных дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве конструктивных слоев нежестких дорожных одежд автомобильных дорог повышенной долговечности.

**Беспалов Віталій Леонідович** – доктор технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, які використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Бледнов Олег Віталійович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, які використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Дзюба Олександр Сергійович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: використання техногенної сировини в дорожньому будівництві.

**Кичигин Владислав Юрійович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: отримання технологічних і довговічних дорожніх бетонів для будівництва конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів на основі модифікування органічних в'язучих.

**Фищук Владислав Васильович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, що використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Шкода Игорь Миколайович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: синтез органічних в'язучих для виробництва композиційних дорожньо-будівельних матеріалів, що використовуються при будівництві конструктивних шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг підвищеної довговічності.

**Bespalov Vitaly** – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic astringent for a production road-build materials of compositions, used for building of structural layers of non-rigid travelling clothes of highways of the promoted longevity.

**Blednov Oleg** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic binders for the production of composite road construction materials used in the construction of structural layers of non-rigid pavements of high-durability roads.

**Dzuba Alexander** - master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: application of processed raw materials in road building.

**Kichigin Vladislav** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: production of technological and durable road concretes for the construction of structural layers of non-rigid road pavements based on the modification of organic binders.

**Fishchuk Vladislav** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic binders for the production of composite road construction materials used in the construction of structural layers of non-rigid pavements of high durability roads.

**Skoda Igor** – master's student, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: synthesis of organic binders for the production of composite road construction materials used in the construction of structural layers of non-rigid pavements of high durability roads.

УДК 691.175:678.747:547.665:547.728

**С. И. СОХИНА, О. Н. ШЕВЧЕНКО, Е. В. МУКОНИНА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИТРО-, АМИНОСОДЕРЖАЩИХ СМОЛИСТЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ОКРАСКУ**

**Аннотация.** Смолистые отходы органического синтеза крымского завода «Химпром», содержащие ингибирующие коррозионный процесс amino- и нитрогруппы, могут быть использованы в качестве травильных присадок при подготовке металлической поверхности под окраску с применением травления в соляной и серной кислотах. Торможение коррозионного процесса, изученное потенциостатическим методом на потенциостате П5827М и гравиметрическим методом, проявляется в интервале концентрации 0,28...0,44 масс. % в растворе соляной кислоты и 0,035...0,550 масс. % в 1н растворе серной кислоты, защитный эффект составляет 70 %. При этом исследуемые отходы относятся к ингибиторам смешанного типа при смешанном контроле, так как наблюдается увеличение поляризуемости на анодных и катодных участках коррозионных процессов. Использование ингибирующих смолистых отходов в качестве травильных присадок предполагает точный контроль их концентрации как на верхней, так и на нижней границах определенного интервала, так как данные добавки можно охарактеризовать как «опасные» ингибиторы, т. е. в зависимости от концентрации они могут как ингибировать, так и стимулировать (катализировать) коррозию железа. Утилизация рассмотренных отходов в ингибирующие добавки травильных растворов позволит улучшить экологическую чистоту производства.

**Ключевые слова:** ингибиторы кислотного травления, потенциостатические исследования, утилизация amino-нитросодержащих смолистых отходов химического производства.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

В связи с непрерывным повышением требований к качеству антикоррозионных покрытий и самих процессов окраски необходимо постоянно совершенствовать способы подготовки металлической поверхности.

В тех случаях, когда механические способы очистки металла либо невозможны (например, при очистке изделий небольшой толщины, сложной конфигурации), либо экономически нецелесообразны, применяют химические методы, из которых наиболее распространенным является травление – удаление окислов и ржавчины при воздействии травильных (кислотных) растворов.

Таким способом проводят дополнительную подготовку металлической поверхности к нанесению защитного покрытия, что улучшает сцепление наносимого слоя покрытия с основой.

Наиболее часто травление углеродистых сталей осуществляется в 8...20%-м растворе серной кислоты или 10...20%-м соляной кислоты. При этом в процессе травления низкоуглеродистых сталей с целью удаления оксидов железа 55 % кислоты расходуется на растворение окислов и ржавчины и 55 % – на растворение самой стали.

Так, известно, что при травлении теряется от 2 до 4 % протравливаемой стали. Поэтому кислотное травление проводят с обязательным добавлением ингибиторов коррозии.

Применение ингибиторов (травильных присадок) коррозии дает возможность улучшить процесс травления. Использование ингибиторов позволяет уменьшить расход кислоты и потери металла при травлении, предохранить металл от водородной хрупкости.

Известно, что в качестве ингибиторов используются азотсодержащие соединения органической природы, такие как амины, пиридины, нитросоединения, четвертичные соли пиридиновых оснований [1]. Однако важным недостатком многих синтетических ингибиторов является их высокая стоимость и малая доступность сырья.

© С. И. Сохина, О. Н. Шевченко, Е. В. Муконина, 2021

**Целью данной работы** является изучение возможности использования amino-, нитросодержащих смолистых отходов органического синтеза в качестве ингибирующих добавок при кислотном травлении металла.

Ингибирующие свойства этих отходов ранее были нами изучены и использованы в качестве компонентов в защитных покрытиях по металлической поверхности [2, 3].

В связи с этим значительный интерес представляет изучение предложенных отходов и в качестве ингибиторов при травлении металла в растворах кислот.

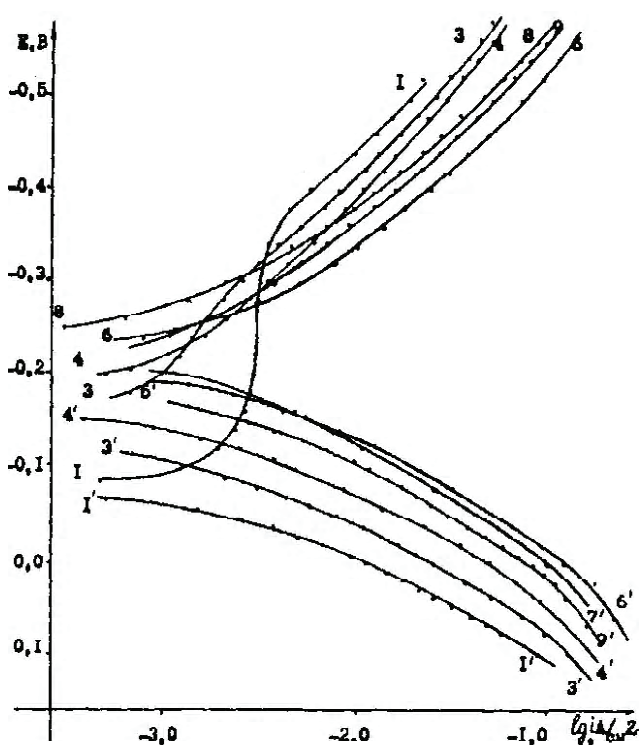
Исследуемые отходы [4] представляют собой смолистую массу, близкую по содержанию азота (13,20 %) к аминостиролу (11,76 %), содержат (по данным ИК-спектроскопии)  $\text{NO}_2$  – группу ( $1360; 1520 \text{ см}^{-1}$ ) и  $\text{NH}_2$  – группу ( $3450 \text{ см}^{-1}$ ) и являются смесью первичных, вторичных и третичных нитрооксиаминов такого состава:

$\text{O}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{NH}_2$	– 19...21 %;
$(\text{O}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2)_2\text{NH}$	– 60...63 %;
$(\text{O}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2)_3\text{N}$	– 7...8 %;
Неидентифицированный остаток	– 11...13 %.

Такой широкий спектр функционально-активных групп и структур отдельных компонентов сложной смеси отходов обусловил выбранную последовательность изучения ингибирующих свойств [1].

Определение ингибирующих свойств отдельных компонентов смеси позволило выявить вклад каждого из них в суммарный защитный эффект. За счет перераспределения электронной плотности на атоме азота аминогруппы и большей окислительной способности, связанной с большим числом нитрогрупп, основные свойства вторичных и третичных аминов выражены в меньшей степени по сравнению с первичным. Для иллюстрации ингибирующего эффекта таких соединений приведены результаты исследования первичного амина:  $\text{O}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{NH}_2$ , называемый далее «оксиамином».

Защитное действие ингибирующих добавок изучали в кислых растворах (20 %  $\text{HCl}$ , 1 н. и 2 н. растворах  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) на стальных образцах (Ст. 3) с использованием потенциодинамического [5] и гравиметрического методов.



**Рисунок 1** – Поляризационные кривые для стального электрода при 20 °С в 20%-м растворе  $\text{HCl}$  в зависимости от концентрации amino-, нитросодержащих смолистых отходов (в мас. %): 1 – 1,1; 2 – 0,44; 3 – 0,17; 4 – 0,07; 6 – 0,003; 7 – 0,0006; 9 – 0 (фоновый раствор).

По изменению стационарного потенциала электрода ( $\Delta E$ ) и наклону таффелевских участков поляризационных кривых (рисунок 1), выражающих степень затрудненности протекания электродных реакций, определены катодная и анодная поляризуемости ( $b_k, b_a$ ). Скорость растворения металла определяли по плотности тока (электрохимическая скорость –  $K_1$ ) и по потере массы образца (гравиметрическая скорость –  $K_2$ ), по которым рассчитывали соответствующие коэффициенты ингибирования ( $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ ) (таблица).

Поляризационные кривые, полученные на потенциостате П5827М в зависимости от содержания смолы в растворе кислоты, свидетельствуют о том, что и чистый «оксиамин», и смола, растворенные в кислоте, относятся к ингибиторам смешанного типа при смешанном контроле, так как наблюдается увеличение поляризуемости обоих химических процессов как в чистой кислоте (фоновый раствор), так и в растворе кислоты с данными добавками.

Внесение исследуемых соединений в растворы кислот приводит к смещению стационарного потенциала стального электрода ( $\Delta E_{\text{ст}}$ ).

Однако если малые концентрации добавок увеличивают отрицательное значение стандартного потенциала ( $E$ ), т. е. возникает

**Таблица** – Кинетические характеристики растворения металла в растворах кислот с ингибирующими добавками

C, %·10 <sup>3</sup>	Потенциодинамический метод						Гравиметрический метод	
	-E, мВ	ΔE, мВ	K <sub>1</sub> ·10 <sup>4</sup> , А/см <sup>2</sup>	b <sub>к</sub>	b <sub>а</sub>	γ <sub>1</sub>	K <sub>2</sub> , г/м <sup>2</sup> ·час	γ <sub>2</sub>
20 % раствор HCl с добавлением нитро-, аминоксодержащих отходов								
1 100	110	102	23,70	0,188	0,124	0,53	15,34	0,50
440	130	82	6,92	0,182	0,139	1,82	7,65	1,12
170	160	52	4,79	0,197	0,096	2,63	5,89	1,45
70	180	32	8,32	0,228	0,095	1,51	4,68	1,82
28	215	-3	13,80	0,226	0,117	0,91	6,89	1,24
2,8	218	-6	20,89	0,160	0,121	0,60	11,84	0,72
0,56	221	-9	15,50	0,167	0,120	0,81	13,99	0,61
0,14	220	-8	13,34	0,182	0,114	0,94	15,35	0,56
0,00	212	-	12,58	0,167	0,125	1,00	8,53	1,00
1н раствор серной кислоты с добавлением оксиамина								
10,0	215	45	7,90	0,143	0,038	0,67	14,64	0,43
4,0	234	26	4,17	0,143	0,046	1,27	3,24	1,95
1,6	232	28	5,01	0,148	0,046	1,06	4,36	1,45
0,64	244	16	5,37	0,148	0,053	0,99	11,22	0,56
0,00	260	-	5,31	0,125	0,067	1,00	6,33	1,00
2н раствор серной кислоты с добавлением оксиамина								
10,0	140	110	12,59	0,450	0,110	0,36	-	-
4,0	200	50	5,23	0,300	0,125	0,87	-	-
1,6	215	45	3,31	0,250	0,133	1,38	-	-
0,64	260	-10	4,57	0,200	0,200	1,00	-	-
0,00	250	-	4,57	0,167	2,00	1,00	-	-

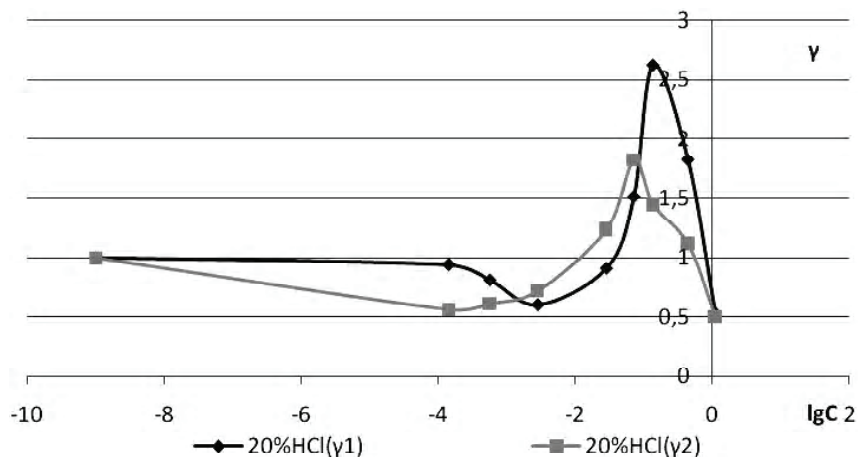
отрицательный Ψ-потенциал, то более высокие концентрации их, выше определенного значения так называемой минимальной защитной концентрации [2], сдвигают E в положительную область, навязывая положительное значение Ψ-потенциала электроду. Таким образом, при действии добавок имеет место существенный адсорбционный эффект. Наблюдается и изменение наклона поляризационных кривых с изменением концентрации ингибитора.

Очевидно, что механизм действия изучаемых соединений зависит также от ряда других эффектов, которые либо влияют одновременно на скорость коррозии, либо сменяются полностью в зависимости от концентрации добавки. В сумме же изменение потенциалов и поляризуемостей отдельных электродных реакций приводит к значительному торможению анодной реакции за счет ускорения катодной при больших концентрациях добавок. При малых концентрациях механизм их действия сменяется на противоположный: идет замедление катодного парциального процесса и ускорение анодного. Исходя из значений скорости суммарного коррозионного процесса в зависимости от концентрации ингибитора (таблица) данные добавки можно охарактеризовать как «опасные» ингибиторы [6], т. е. в зависимости от концентрации они могут как ингибировать, так и стимулировать (катализировать) коррозию железа.

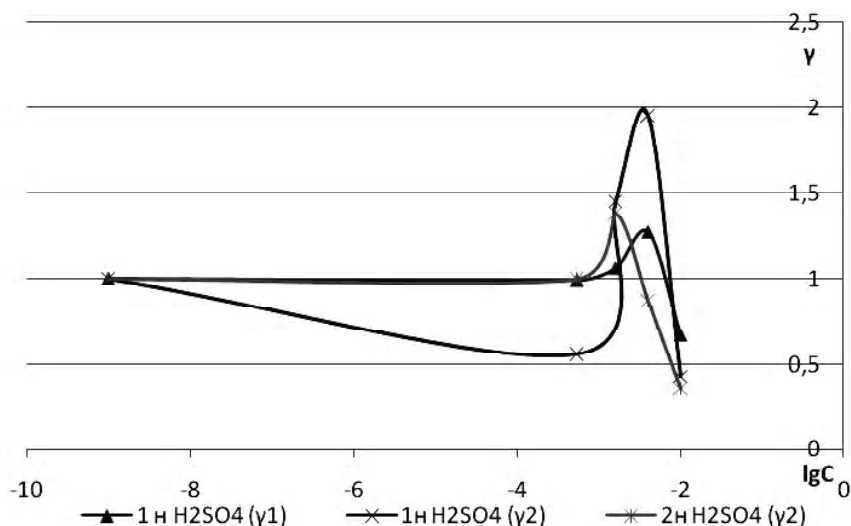
Зависимость коэффициента ингибирования (γ) коррозии металла в растворах кислот от концентрации в них смолистых отходов и чистого оксиамина (таблица) показывает, что γ = 1 соответствует коррозии без использования добавок, γ > 1 соответствует процессу ингибирования, γ < 1 – стимулированию его.

Для индивидуального вещества (оксиамина) этот интервал от 1·10<sup>-3</sup> до 8·10<sup>-3</sup> моль/л в 1н растворе серной кислоты. С увеличением концентрации серной кислоты он смещается (рисунок 4) в сторону меньшего содержания добавки, что можно объяснить ускорением наступления пассивации металла в более концентрированной серной кислоте и, соответственно, меньшим влиянием одного и того же небольшого количества добавки в 2н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> по сравнению с влиянием его в 1н растворе. Для нитро- и аминоксодержащих отходов этот интервал защитного эффекта находится от 0,035 масс. % до 0,55 масс. %. Защитный эффект смолы в растворе HCl, определенный гравиметрическим и потенциостатическим методами, достигает 70 % в интервале (рисунок 2) концентрации нитроаминсмолы (0,28...0,44 масс. %).

Наложение зависимостей γ от -lgC, полученных двумя независимыми методами позволяет найти область перекрытия, отсекаемую прямой линией (γ = 1 для фонового раствора) и определить интервал концентраций, где добавка ведет себя как ингибитор коррозии (рисунки 2–4).



**Рисунок 2** – Зависимость коэффициента ингибирования коррозии металла ( $\gamma$ ) от концентрации нитро- и аминоксодержащих смолистых отходов в 20%-м растворе HCl: потенциостатическим методом ( $\gamma_1$ ); гравиметрическим методом ( $\gamma_2$ ).



**Рисунок 3** – Зависимость коэффициента ингибирования коррозии металла ( $\gamma$ ) от концентрации «оксиамин» в растворе серной кислоты: потенциостатическим методом ( $\gamma_1$ ); гравиметрическим методом ( $\gamma_2$ ).

## ВЫВОДЫ

Исследуемые смолистые отходы, содержащие в своем составе амино- и нитрогруппы, могут быть отнесены к ингибиторам смешанного типа, так как в процессе травления металла в кислых средах происходит торможение коррозионного процесса как на анодных, так и на катодных участках.

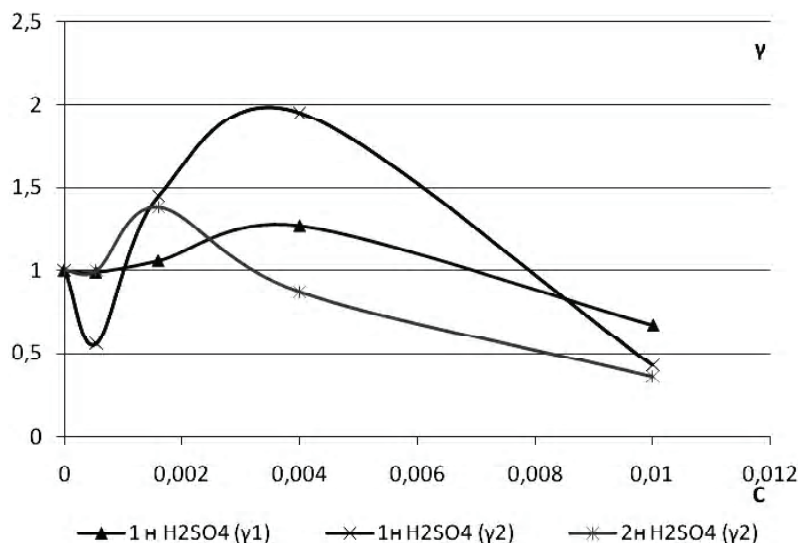
Защитный эффект исследуемых смолистых добавок составляет 70 % в интервале концентрации 0,28...0,44 масс. % в растворе соляной кислоты и 0,035...0,550 масс. % в 1н растворе серной кислоты.

При использовании таких добавок в качестве травильных присадок необходимо точно контролировать их концентрацию как на верхней, так и на нижней границах определенного интервала.

Утилизация рассмотренных отходов в ингибирующие добавки травильных растворов позволит улучшить экологическую чистоту производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоцкий, Ю. Б. Строение и ингибирующее действие производных стирола в пленках по стали / Ю. Б. Высоцкий, А. П. Доня, Е. Ю. Балабанов. – Текст : непосредственный // Защита металлов. – 1990. – Т. 26, N 4. – С. 591–597.



**Рисунок 4** – Зависимость коэффициента ингибирования коррозии металла ( $\gamma$ ) от концентрации (моль/л) «оксиамины» в растворе серной кислоты: потенциостатическим методом ( $\gamma_1$ ); гравиметрическим методом ( $\gamma_2$ ).

2. Сохина, С. И. Влияние модифицирующих добавок на скорость разрушения защитных покрытий при прогнозировании их долговечности / С. И. Сохина, Ю. В. Селютин, О. Н. Шевченко. – Текст : непосредственный // Химическая термодинамика и кинетика : сборник материалов III Международной конференции, 28–29 мая 2015 г., Великий Новгород. – Великий Новгород : Издательско-полиграфический центр Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, 2015. – С. 207–209.
3. О прогнозировании времени жизни антикоррозионных покрытий по стали / Е. В. Горохов, Ю. Б. Высоцкий, А. П. Доя [и др.]. – Текст : непосредственный // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, N 1. – С. 63–66.
4. Экологические проблемы промышленных мегаполисов и утилизация отходов в противокоррозионные материалы / Ю. Б. Высоцкий, С. И. Сохина, О. Н. Шевченко [и др.]. – Текст : непосредственный // Экологические проблемы промышленных мегаполисов : сборник материалов III международной научно-практической конференции-выставки, 23–27 мая 2006 г., Донецк. – Донецк : ДонНТУ Министерства образования и науки Украины, 2006. – С. 249–253.
5. Горохов, Е. В. Потенциостатические исследования защитных свойств новых противокоррозионных материалов на основе тяжелой фракции бензола / Е. В. Горохов, Ю. Б. Высоцкий, В. П. Королев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2003. – Вип. № 1(38) Композиційні матеріали для будівництва. – С. 13–16.
6. Сохина, С. И. Проблемы промышленных городов и утилизация отходов в противокоррозионные материалы / С. И. Сохина, Ю. В. Селютин, Д. Ю. Букина. – Текст : непосредственный // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник материалов X Международной научной конференции, 15 апреля 2015 г., Донецк. – Донецк : ДонНТУ, 2015. – С. 43–48.

Получено 15.01.2021

С. И. СОХИНА, О. М. ШЕВЧЕНКО, О. В. МУКОНІНА  
 ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НІТРО- І АМІНОВІСНИХ  
 СМОЛИСТИХ ВІДХОДІВ ПРИ ПІДГОТОВЦІ МЕТАЛЕВОЇ ПОВЕРХНІ ПІД  
 ЗАБАРВЛЕННЯ  
 ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Смолянисті відходи органічного синтезу кримського заводу «Хімпром», що містять інгібуючі корозійний процес аміно- і нітрогрупи, можуть бути використані як травильні присадки при підготовці металевої поверхні під пофарбування із застосуванням травлення в соляній і сірчаній кислотах. Гальмування корозійного процесу, вивчене потенціостатичним методом на потенціостаті П5827М і гравіметричним методом, проявляється в інтервалі концентрацій 0,28...0,44 мас. % в розчині соляної кислоти і 0,035...0,550 мас. % у 1н розчині сірчаної кислоти, захисний ефект складає 70 %. При цьому досліджувані відходи відносяться до інгібіторів змішаного типу при змішаному контролі, оскільки спостерігається збільшення поляризованості на анодних і катодних ділянках корозійних процесів. Використання інгібуючих смолянистих відходів як травильних присадок припускає точний контроль їх концентрації як на верхній, так і на нижній межах певного інтервалу, оскільки ці добавки можна



охарактеризувати як «небезпечні» інгібітори, тобто залежно від концентрації вони можуть як інгібувати, так і стимулювати (каталізувати) корозію заліза. Утилізація розглянутих відходів в інгібуючі добавки травильних розчинів дозволить поліпшити екологічну чистоту виробництва.

**Ключові слова:** інгібітори кислотного травлення, потенціостатичні дослідження, утилізація аміно- і нітровмісних смолистих відходів хімічного виробництва.

SVETLANA SOKHINA, OLGA SHEVCHENKO, ELENA MUKONINA  
ON THE POSSIBILITY OF USING NITRO-, AMINO-CONTAINING RESINOUS  
WASTE IN THE PREPARATION OF A METAL SURFACE FOR PAINTING  
Donbas National Academy of Construction and Architecture

**Abstract.** Resinous waste of organic synthesis of the Crimean plant «Himprom», containing inhibiting the corrosion process of amino and nitro groups, can be used as etching additives in the preparation of the metal surface for painting with the use of etching in hydrochloric and sulfuric acids. The inhibition of the corrosion process, studied by the potentiostatic method on the P5827M potentiostat and by the gravimetric method, is manifested in the concentration range of 0.28...0.44 wt. % in a solution of hydrochloric acid and 0.035...0.550 wt.% in a 1h solution of sulfuric acid, the protective effect is 70 %. At the same time, the studied waste belongs to the mixed-type inhibitors under mixed control, since there is an increase in polarizability at the anode and cathode sites of corrosion processes. The use of inhibitory resinous waste as pickling additives involves precise control of their concentration, both at the upper and lower limits of a certain interval, since these additives can be characterized as «dangerous» inhibitors, i. e., depending on the concentration, they can both inhibit and stimulate (catalyze) iron corrosion. Recycling of the considered waste into inhibitory additives of pickling solutions will improve the environmental cleanliness of production.

**Key words:** acid etching inhibitors, potentiostatic studies, utilization of amino-nitro-containing resinous wastes of chemical production.

**Сохина Светлана Ивановна** – кандидат химических наук, доцент кафедры прикладной химии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теоретические и экспериментальные исследования физико-химических свойств и химических превращений органических соединений, используемых в строительстве; синтез низко- и высокомолекулярных соединений, содержащих ингибирующие и хромофорные группы.

**Шевченко Ольга Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной химии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теоретические и экспериментальные исследования физико-химических свойств и химических превращений органических соединений, используемых в строительстве; синтез низко- и высокомолекулярных соединений, содержащих ингибирующие группы.

**Муконина Елена Владимировна** – ассистент кафедры прикладной химии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теоретические и экспериментальные исследования физико-химических свойств и химических превращений органических соединений, используемых в строительстве; синтез низко- и высокомолекулярных соединений, содержащих ингибирующие и хромофорные группы.

**Сохина Світлана Іванівна** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри прикладної хімії ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теоретичні та експериментальні дослідження фізико-хімічних властивостей і хімічних перетворень органічних сполук, що використовуються в будівництві; синтез низко- і високомолекулярних сполук, що містять інгібуючі і хромофорні групи.

**Шевченко Ольга Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної хімії ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теоретичне та експериментальне дослідження фізико-хімічних властивостей та хімічних перетворень органічних сполук, що використовуються у будівництві; синтез низко- і високомолекулярних сполук, що містять інгібуючі угруповання.

**Муконіна Олена Володимирівна** – ассистент кафедри прикладної хімії ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теоретичні та експериментальні дослідження фізико-хімічних властивостей і хімічних перетворень органічних сполук, що використовуються в будівництві; синтез низко- і високомолекулярних сполук, що містять інгібуючі і хромофорні групи.

**Sokhina Svetlana** – Ph. D. (Chemical), Associate Professor, Applied Chemistry Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: theoretical and experimental studies of physical and chemical properties and chemical transformations of organic compounds used in construction; synthesis of low and high molecular weight compounds containing inhibiting and chromophore groups.

**Shevchenko Olga** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Applied Chemistry Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: theoretical and experimental research of physicochemical properties and chemical transformations of organic compounds used in civil engineering; synthesis of low-molecular and high-molecular compounds including inhibitory groups.

**Mukonina Elena** – Assistant, Applied Chemistry Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: theoretical and experimental studies of physical and chemical properties and chemical transformations of organic compounds used in construction; synthesis of low and high molecular weight compounds containing inhibiting and chromophore groups.

УДК 538.953

**Н. В. ЩЕБЕТОВСКАЯ, Е. А. ПОКИНТЕЛИЦА, О. В. АЛЕКСАНДРОВА**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ И  
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** В данной работе на основе анализа последних исследований и публикаций в краткой форме изложены основные принципы разработки теплоаккумулирующих материалов на основе фазопереходных процессов. Приводятся сведения по теплофизическим характеристикам различных низкомолекулярных органических соединений и их смесей, которые лучше всего подходят для теплоаккумулирующих материалов. Для успешного использования органических веществ в аккумуляторах теплоты проведены углубленные систематические исследования их теплофизических характеристик и особенностей фазовых превращений типа плавление-кристаллизация. Составлена сводная таблица по убывающей степени полезности теплоаккумулирующих материалов. Применён однофакторный дисперсионный анализ для определения наиболее перспективного вещества для эффективного и рационального использования теплового аккумулятора для поддержания нормальной температуры помещения. С помощью пакета приложения «Excel» выбран фактор, который имеет наименьшую дисперсию ошибок измерения. В результате чего наиболее подходящим органическим соединением оказался дибензил. Для выбранного теплоаккумулирующего материала установлена зависимость степени полезности от физических свойств.

**Ключевые слова:** теплоаккумулирующие материалы, фазовые переходы, плавление, кристаллизация, однофакторный дисперсионный анализ, термический анализ, переохлаждение.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время в промышленной теплоэнергетике важное значение имеет разработка научных основ эксплуатации и сбережения энергетических ресурсов в теплоэнергетических устройствах, в частности в аккумуляторах теплоты. Аккумулирование теплоты за счёт использования теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) фазового перехода типа плавление-кристаллизация получило широкое применение в различных областях производства и народного хозяйства: в строительной индустрии для обеспечения комфортных условий в жилых и производственных помещениях; в агропромышленном комплексе для сохранения нормальных температур в теплицах; при эксплуатации транспортных средств при повышенных и пониженных температурах (например, при запуске двигателей внутреннего сгорания); при транспортировке лекарств и пищевых продуктов и др. [1–2].

Вместе с тем при совершенствовании конструкций тепловых аккумуляторов (ТА) на сегодняшний день недостаточно внимания уделяется многочисленным особенностям того или иного фазового превращения и их влияния на энергетическую эффективность работы ТА с ТАМ с учетом основополагающих положений теории фазовых превращений, в частности теории кристаллизации расплавов.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В литературе приводятся сведения об использовании в качестве ТАМ в основном кристаллогидратов и некоторых органических соединений (парафина, полиэтилена, ацетамина, октодекана, полиэтиленгликоля и др.). Однако эти вещества обладают рядом недостатков, снижающих их эффективное использование в ТА. Это эффекты дегидратации кристаллогидратов, т. н. «парафиновые

отравления» высокая химическая активность. В этой связи актуальной задачей является поиск новых, ранее не изученных веществ, которые в силу своих энергетических характеристик были бы пригодны для их эффективного использования в качестве ТАМ.

Главными требованиями, предъявляемыми к ТАМ, являются высокие значения теплоты плавления и теплоемкостей, минимизация перегревов и переохлаждений относительно температуры плавления, устойчивость этих параметров к многочисленному термоциклированию, экологическая безопасность и доступность материалов. К обладающим такими свойствами веществам относится целый ряд низкомолекулярных органических соединений (НМОС). Для успешного использования перечисленных веществ в аккумуляторах теплоты необходимы углубленные систематические исследования их теплофизических характеристик и особенностей фазовых превращений типа плавление-кристаллизация, чему и посвящена данная работа.

Нами в работах [3–5] были изучены теплофизические характеристики самых разнообразных НМОС и их смесей, удовлетворяющих основным требованиям, предъявляемым к ТАМ. В этой связи возникла необходимость выявления наиболее перспективных веществ для эффективного и рационального использования ТА для поддержания нормальной температуры помещения.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Из большого числа исследованных НМОС как в виде индивидуальных углеводородов, так и их смесей (свыше 300) были отобраны вещества в количестве 25 наименований, которые по своим теплофизическим характеристикам лучше всего подходят для ТАМ. Кроме того, учтены экономические (цена) и экологические («летальная доза») показатели, а также устойчивость к испарению или возгоранию и длительной эксплуатации (по числу термоциклов нагревания – охлаждения). Отобранные вещества пронумерованы следующими латинскими буквами: А – нафталин (Н), В – дифенил (Д), С – дибензил (Дб), D – дифенилметан (Дм), Е – *o*-терфенил (*o*-Т), F – *m*-терфенил (*m*-Т), G – *p*-терфенил (*p*-Т), Н – 32 % Н + 68 % Дб, I – 49 % Д + 51 % Дб, J – 72 % Дм + 28 % Д, K – 20 % Н + 80 % Дм, L – 50 % *o*-Т + 50 % Дб., М – резорцин (Р), N – пирокатехин (П), О – гидрохинон (Г), P – антрацен, G – кумарин (К), R – бензойная кислота, S – стеариновая кислота, T – уксусная кислота, U – 40 % Н + 60 % Д, V – 61 % К + 39 % Н, W – 50 % Р + 50 % П, X – 33 % Г + 67 % Р, Y – 30 % Г + 70 % П. В таблице 1 приведены характеристики этих веществ в последовательности 1–25.

**Таблица 1** – Физические характеристики ТАМ [6]: I – температура плавления  $T_L$  (°C); II – энтальпия  $\Delta H_{LS}$  плавления (кДж/кг); III – перегрев  $\Delta T_k^+$  расплава (K); IV – переохлаждение  $\Delta T^-$  (K); V, VI – теплоемкости  $c_p^S, c_p^L$  (кДж/кг·K); VII –  $\Delta c = c_p^L - c_p^S$ ; VIII, IX – плотности  $\rho_S, \rho_L$  (г/см<sup>3</sup>); X –  $\Delta \rho = \rho_S - \rho_L$ ; XI – цена ТАМ (руб/г); XII – летальная доза (мг/кг); XIII – число  $n$  термоциклов; XIV – температура кипения  $T_k$  (°C)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
A	80	146,7	5,0	0,4	1,61	1,79	0,18	1,17	1,14	0,02	0,26	300	185	217
B	70	120,6	5,1	0,5	1,28	1,41	0,13	1,18	0,99	0,19	0,22	2 400	125	255
C	51	126,3	2,6	0,6	1,40	1,76	0,36	1,01	0,90	0,11	0,53	2 500	170	264
D	26	113,0	2,7	0,7	1,58	1,97	0,39	1,02	1,01	0,01	0,63	700	200	284
E	57	74,6	2,8	0,8	1,19	1,60	0,41	1,08	0,84	0,18	16,69	10 100	300	332
F	87	134,6	2,9	0,9	1,20	1,81	0,61	1,04	0,87	0,17	9,90	10 000	260	365
G	213	153,7	4,0	1,0	1,21	2,15	0,95	1,26	0,88	0,38	8,83	10 050	310	374
H	32	132,8	1,2	2,0	1,46	1,77	0,31	1,07	0,98	0,08	0,4	1 800	160	249
I	30	123,5	1,1	7,0	1,34	1,59	0,25	1,09	0,94	0,15	0,38	2 450	135	260
J	11	115,1	7,0	1,1	1,50	1,82	0,32	1,06	1,00	0,06	0,51	1 176	180	276
K	20	119,7	4,2	1,2	1,59	1,93	0,34	1,05	1,03	0,03	0,56	620	150	271
L	24	100,5	1,0	18	1,29	1,68	0,39	1,03	0,87	0,15	8,61	6 250	190	298
M	111	193,6	5,2	1,3	1,36	2,01	0,65	1,29	1,16	0,13	1,5	750	100	281
N	105	207,0	5,3	1,4	1,37	2,10	0,74	1,37	1,19	0,18	0,33	300	110	240
O	174	246,1	5,4	1,5	1,30	1,45	0,16	1,36	1,18	0,20	0,9	200	105	287
P	216	162,1	5,5	0,06	1,16	1,28	0,12	1,25	1,04	0,21	1,1	430	200	340
Q	69	131,0	3,0	4,0	1,25	1,42	0,22	0,94	0,90	0,04	1,6	239	120	301
R	122	147,0	2,5	0,01	1,32	1,51	0,19	1,32	1,07	0,25	0,09	3 300	75	249
S	70	215,0	2,4	0,02	1,22	1,33	0,11	0,95	0,84	0,12	0,12	21,5	80	376
T	16	192,0	1,3	0,03	1,35	2,05	0,70	1,07	1,05	0,025	0,09	3 310	115	118

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
U	39	132,0	3,1	0,04	1,41	1,57	0,16	1,20	1,05	0,14	0,24	1 560	135	240
V	43	112,6	2,3	0,05	1,35	1,56	0,21	1,07	0,99	0,07	1,08	263	260	313
W	59	148,9	2,2	0,3	1,37	2,06	0,70	1,34	1,18	0,16	0,90	525	140	261
X	90	170,0	2,1	0,2	1,34	1,83	0,49	1,31	1,17	0,14	1,30	569	130	283
Y	86	213,0	2,0	0,1	1,33	1,91	0,57	1,38	1,18	0,19	0,50	270	145	254

Поскольку эти характеристики практически не зависят друг от друга, в данной работе применён однофакторный дисперсионный анализ для определения вещества, наиболее всего соответствующего ТАМ.

В результате была составлена сводная таблица 2 по убывающей степени полезности ТАМ, обозначенные баллами от 1 до 25 (наилучший – один балл, наихудший – 25 баллов).

Таблица 2 – Степени полезности ТАМ

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
A	8	12	7	10	1	12	6	14	14	2	6	20	8	25
B	4	19	6	11	19	23	3	15	7	20	4	9	18	24
C	5	17	15	12	7	14	14	3	4	9	13	7	10	13
D	14	22	14	13	3	6	15	4	9	1	15	14	5	12
E	2	25	13	14	24	16	17	12	1	18	25	1	2	1
F	9	13	12	15	23	11	20	6	2	17	24	2	4	2
G	23	9	9	16	22	1	25	18	3	25	23	3	1	3
H	12	14	23	22	5	13	11	9	6	8	10	10	11	22
I	13	18	24	24	13	17	10	13	5	14	9	8	16	19
J	24	21	1	17	4	10	12	8	8	6	12	2	9	17
K	16	20	8	18	2	7	13	7	10	4	14	15	12	18
L	15	24	25	25	18	15	16	5	2	15	22	4	7	15
M	19	5	5	19	10	5	21	19	15	11	20	13	23	4
N	18	4	4	20	9	2	24	24	18	21	8	19	21	8
O	21	1	3	21	17	21	4	23	17	22	17	24	22	7
P	22	8	2	6	25	25	2	17	11	23	19	18	6	6
Q	3	16	11	23	20	22	9	1	4	5	21	23	19	10
R	20	11	16	1	16	20	7	21	13	24	2	6	24	5
S	4	2	17	2	21	24	1	2	1	10	3	25	25	11
T	17	6	22	3	11	4	22	10	12	3	1	5	20	9
U	7	15	10	4	6	18	5	16	12	12	5	11	15	23
V	6	23	18	5	12	19	8	11	7	7	18	22	3	14
W	1	10	19	9	8	3	23	22	17	16	16	17	14	21
X	11	7	20	8	14	9	18	20	16	13	7	16	17	16
Y	10	3	21	7	15	8	19	25	17	19	11	21	13	20

Основная идея однофакторного дисперсионного анализа заключается в сравнении дисперсии исследуемого признака, вызванной действием фактора, с дисперсией ошибок измерения этого признака. Если различие между ними значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемый признак. Данная задача решалась с помощью пакета приложения Excel, в котором имеется инструмент «Однофакторный дисперсионный анализ».

## ВЫВОДЫ

Программа выдала результаты, приведенные в таблицах 3 и 4. Из таблицы 3 видно, что наименьшую дисперсию имеет фактор под номером 3 (в нашем случае это дибензил (Дб) – дисперсия равна 19,7). Из таблицы 4 следует, что расчетное значение  $F = 0,71$  меньше табличного значения  $F_{кр} = 1,55$ , следовательно, гипотеза о равенстве средних принимается.

По данным таблицы 2 на рисунке построен график характеристик дибензила.

Таблица 3 – Однофакторный дисперсионный анализ. Итоги

Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Строка 1	14	145	10,35714286	42,86263736
Строка 2	14	182	13	56,76923077
Строка 3	14	143	10,21428571	19,71978022
Строка 4	14	147	10,5	35,34615385
Строка 5	14	171	12,21428571	86,64285714
Строка 6	14	160	11,42857143	59,18681319
Строка 7	14	181	12,92857143	94,07142857
Строка 8	14	176	12,57142857	33,95604396
Строка 9	14	203	14,5	31,65384615
Строка 10	14	151	10,78571429	47,71978022
Строка 11	14	164	11,71428571	30,68131868
Строка 12	14	208	14,85714286	61,05494505
Строка 13	14	189	13,5	46,73076923
Строка 14	14	200	14,28571429	63,91208791
Строка 15	14	220	15,71428571	67,75824176
Строка 16	14	190	13,57142857	73,8021978
Строка 17	14	187	13,35714286	65,78571429
Строка 18	14	186	13,28571429	64,52747253
Строка 19	14	148	10,57142857	96,26373626
Строка 20	14	145	10,35714286	53,63186813
Строка 21	14	159	11,35714286	31,78571429
Строка 22	14	173	12,35714286	44,4010989
Строка 23	14	196	14	47,07692308
Строка 24	14	192	13,71428571	21,2967033
Строка 25	14	209	14,92857143	41,14835165

Таблица 4 – Дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Между группами	901,1428571	24	37,54761905	0,712324065	0,839164	1,550931
Внутри групп	17 131,21429	325	52,71142857			
Итого	18 032,35714	349				

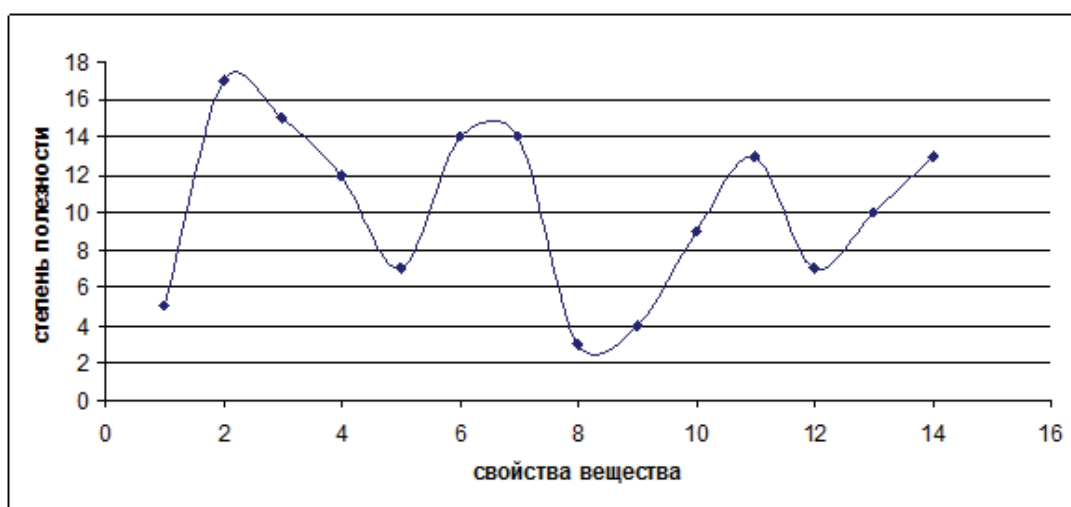


Рисунок – Зависимость степени полезности от физических свойств для образца дибензила.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман, Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли [перевод с английского В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова] ; под редакцией В. М. Бродянского. – Москва : Мир, 1987. – 272 с. – Текст : непосредственный.
2. Левенберг, В. Д. Аккумулирование тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Техника, 1991. – 112 с. – Текст : непосредственный.
3. Александров, В. Д. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных жидкостей и аморфных сред (сборник избранных трудов) / В. Д. Александров. – Донецк : Донбасс, 2011. – 590 с. – Текст : непосредственный.
4. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных расплавов и растворов / В. Д. Александров, В. А. Постников, С. А. Фролова, О. В. Соболев [и др.] (сборник избранных трудов : в 2 частях, часть 2) ; под общей редакцией В. Д. Александрова ; ГОУ ВПО «ДонНАСА». – Донецк : Донбасс, 2018. – 412 с. – Текст : непосредственный.
5. Термодинамика и кинетика кристаллизации низкомолекулярных органических веществ : монография / В. Д. Александров, В. А. Постников, Н. В. Щебетовская, Е. А. Покинтелица ; ГОУ ВПО «ДОННАСА». – Донецк : Донбасс, 2020. – 424 с. – Текст : непосредственный.
6. Справочник химика : [в 3 томах]. Т. 1. Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника ; под редакцией Б. И. Никольского. – Ленинград : Госхимиздат, 1962. – 1071 с. – Текст : непосредственный.

Получено 20.01.2021

### Н. В. ЩЕБЕТОВСЬКА, О. А. ПОКИНТЕЛИЦЯ, О. В. АЛЕКСАНДРОВА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВЛЕННЯ І КРИСТАЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ТЕПЛОАКУМУЛЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У даній роботі на основі аналізу останніх досліджень і публікацій в стислій формі викладені основні принципи розробки теплоакумулювальних матеріалів на основі фазоперехідних процесів. Наводяться відомості з теплофізичних характеристик різних низкомолекулярних органічних сполук і їх сумішей, які найкраще підходять для теплоакумулювальних матеріалів. Для успішного використання органічних речовин в акумуляторах теплоти проведені поглиблені систематичні дослідження їх теплофізичних характеристик і особливостей фазових перетворень типу плавлення-кристалізація. Складена зведена таблиця в порядку спадання ступеня корисності теплоакумулювальних матеріалів. Застосовано однофакторний дисперсійний аналіз для визначення найбільш перспективної речовини для ефективного і раціонального використання теплового акумулятора для підтримки нормальної температури приміщення. За допомогою пакета додатка «Excel» обрано фактор, який має найменшу дисперсію помилок вимірювання. В результаті чого найбільш придатною органічною сполукою виявився дибензил. Для обраного теплоакумулювального матеріалу встановлена залежність ступеня корисності від фізичних властивостей.

**Ключові слова:** теплоакумулювальні матеріали, фазові переходи, плавлення, кристалізація, однофакторний дисперсійний аналіз, термічний аналіз, переохолодження.

### NATALIYA SHCHEBETOVSKAYA, OLENA POKYNTELYTSIA, OLGA ALEKSANDROVA THERMOPHYSICAL FEATURES OF MELTING AND CRYSTALLIZATION OF ORGANIC HEAT-ACCUMULATING MATERIALS Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** In this paper, based on the analysis of recent studies and publications, the basic principles of the development of heat-storage materials based on phase transition processes are outlined in a brief form. Information on the thermophysical characteristics of various low-molecular organic compounds and their mixtures, which are best suited for heat-accumulating materials, is given. For the successful use of organic substances in heat accumulators, in-depth systematic studies of their thermophysical characteristics and features of phase transformations of the melting-crystallization type have been carried out. A summary table has been compiled for the decreasing degree of usefulness of heat storage materials. A one-way analysis of variance was applied to determine the most promising substance for efficient and rational use of a heat accumulator to maintain a normal room temperature. With the help of the application package «Excel» the factor that has the smallest variance of measurement errors was selected. As a result, the most suitable organic compound was dibenzyl. For the selected heat-accumulating material, the dependence of the degree of utility on physical properties has been established.

**Key words:** heat storage materials, phase transitions, melting, crystallization, one-way analysis of variance, thermal analysis, overcooling.

**Щебетовская Наталья Витальевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: термодинамика и кинетика фазовых превращений.

**Покинтелица Елена Анатольевна** – доцент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: термодинамика и кинетика фазовых превращений.

**Александрова Ольга Валерьевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и информатики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение методов математической статистики для описания физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

**Щебетовська Наталія Віталіївна** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри фізики і фізичного матеріалознавства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: термодинаміка та кінетика фазових перетворень.

**Покинтелиця Олена Анатоліївна** – доцент кафедри фізики і фізичного матеріалознавства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: термодинаміка та кінетика фазових перетворень.

**Александрова Ольга Валеріївна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики та інформатики ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: методи математичної статистики при аналізі фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

**Shchebetovskaya Nataliya** – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Physics and Physical Materials Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamics and kinetics of phase transitions.

**Pokyntelytsia Olena** – Associate Professor, Physics and Physical Materials Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamics and kinetics of phase transitions.

**Aleksandrova Olga** – Ph. D. (Physics-Mathematic Science), Associate Professor, Higher Mathematics and Computer Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.



УДК 624.21

**Д. И. БОРОДАЙ, О. А. СЕМЕНОВ, В. В. ФЕДОТОВ, В. В. ЛУЧКОВ**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ**

**Аннотация.** В работе выполнен анализ проблемы управления техническим состоянием эксплуатируемых автодорожных мостов. Показано, что не менее 7 % мостов на автомобильных дорогах местной сети находятся в аварийном или предаварийном состоянии. Предложено в условиях недостаточности информации по техническому состоянию эксплуатируемых автодорожных мостов с целью оптимизации процесса принятия управленческих решений применять технологию информационного моделирования. Для эксплуатируемых мостов предлагается использовать технологию разработки цифровых двойников сооружений. Приводится описание технологии цифровых двойников объектов строительства. Даются рекомендации по использованию цифровых двойников при решении задач в области эксплуатации автодорожных мостов.

**Ключевые слова:** эксплуатация автодорожных мостов, управление техническим состоянием мостов, технология информационного моделирования, цифровой двойник.

### **ПОСТАНОВКА НАУЧНОЙ ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ**

Автодорожные мосты являются критическим элементом транспортной инфраструктуры. Выход из строя таких сооружений в результате физического или морального износа приводит к нарушению функционирования автодорожной сети со значительными финансовыми издержками. Процедура управления техническим состоянием автодорожных мостов является тем инструментом, который позволяет собственнику (республиканский орган исполнительной власти, обеспечивающий формирование и реализацию государственной политики в сфере транспорта, и органы местного самоуправления) оказывать влияние на такие параметры функционирования и развития сети автомобильных дорог, как безопасность движения, грузооборот, пассажирооборот.

Фактическое техническое состояние автодорожных мостов и путепроводов особенно на дорогах местного значения и на дорогах населенных пунктов свидетельствует о значительных проблемах в реализации механизма управления техническим состоянием дорожных сооружений. Согласно данным национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [1] на 31.12.2017 год в Российской Федерации доля автомобильных дорог регионального значения и дорог городских агломераций, соответствующих нормативным требованиям, составляла 43,1 и 42 % соответственно.

В процессе реализации дорожного нацпроекта было установлено, что: «... актуальной проблемой и узким местом региональной дорожной сети являются мосты и путепроводы. На автодорожной сети в стране в целом 71 тыс. мостов и путепроводов, на региональных дорогах – 64 тыс. таких объектов. Порядка 7 % мостов находится в аварийном и предаварийном состоянии, которое требует введения ограничений для проезда автотранспорта...» [2].

Федеральным дорожным агентством «Росавтодор» проведена масштабная работа по сбору данных об аварийных и предаварийных мостах и путепроводах с целью формирования паспорта федерального проекта «Мосты и путепроводы» [3]. На сегодняшний день количество заявленных регионами искусственных сооружений составляет 5,7 тыс. единиц. Общая протяженность аварийных и предаварийных мостов, путепроводов и эстакад возросла до 290 тыс. пог. м. Исходя из этого, предва-

рительная оценка федеральной поддержки для приведения этих объектов в нормативное состояние составляет 370 млрд рублей [4].

Приведенные факты свидетельствуют об актуальности проблемы технического состояния автодорожных мостов и путепроводов и недостатках существующей системы управления техническим состоянием объектов транспортной инфраструктуры. Поиск механизмов и технологий, которые помогут оптимизировать и усовершенствовать систему управления техническим состоянием искусственных сооружений с целью решения стратегической задачи обеспечения эффективного функционирования автодорожной сети, является актуальной научной задачей в области дорожного строительства.

Одной из перспективных технологий является технология BIM или технология информационного моделирования в строительстве (ТИМ). ТИМ представляет собой процесс создания и использования информации по строящимся, а также завершенным объектам строительства в целях координации входных данных, организации совместного производства и хранения данных, а также их использования для различных целей на всех стадиях жизненного цикла.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является определение рациональной области применения технологии информационного моделирования (ТИМ) в процессе эксплуатации мостов на автомобильных дорогах.

Задачами исследования являются:

- охарактеризовать этапы управления техническим состоянием автодорожных мостов;
- проанализировать недостатки современной системы управления техническим состоянием объектов транспортной инфраструктуры;
- охарактеризовать особенности технологии информационного моделирования в строительстве и технологии создания цифровых двойников объектов капитального строительства;
- определить возможность применения технологии разработки цифровых двойников на стадии эксплуатации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Управление техническим состоянием автодорожных мостов состоит из следующих основных этапов:

- периодический сбор данных о текущем техническом состоянии автодорожных мостов при помощи осмотров, обследований и испытаний;
- анализ данных о текущем техническом состоянии сооружений с целью определения видов (эксплуатационные, ремонтные, строительные), объемов и стоимости выполнения необходимых работ;
- планирование финансирования необходимых работ по строительству, реконструкции, ремонту и эксплуатационному содержанию автодорожных мостов;
- контроль над целевым использованием бюджетных средств при выполнении запланированных работ по обеспечению нормативного технического состояния сооружений.

С точки зрения авторов основным недостатком современной системы управления техническим состоянием мостов на автомобильных дорогах является прежде всего отсутствие актуальной информации о параметрах технического состояния сооружений и механизмов управления информацией по объекту, которое не позволяет рационально планировать объемы и сроки проведения работ по ремонту и эксплуатационному содержанию в условиях ограниченного бюджета. Это не позволяет оценить темпы роста доли сооружений, находящихся в неудовлетворительном состоянии, что приводит к периодическим разрушениям конструкций эксплуатируемых мостов.

Перспективным решением проблемы может стать использование в процессе управления дорожной сетью технологии информационного моделирования.

Одной из основных задач при использовании технологии информационного моделирования является создание на этапе изысканий и проектирования цифровой информационной модели объекта строительства с последующей ее актуализацией на этапах строительства и эксплуатации.

Цифровая информационная модель – это объектно-ориентированная параметрическая трехмерная модель, представляющая в цифровом виде физические, функциональные и прочие характеристики объекта (или его отдельных частей) в виде совокупности информационно насыщенных элементов [5].

В настоящее время основной проблемой использования ТИМ в строительстве является отсутствие четкого понимания у технического заказчика, какие задачи ему необходимо решить при помощи цифровых информационных моделей объекта строительства. И если в большей степени проектировщики и в меньшей степени строители решают при помощи ТИМ свои задачи на этапах проектирования и строительства объекта, то после введения в эксплуатацию построенного объекта информационные модели, если они все-таки были разработаны, практически не используются техническим заказчиком. В то же время в управлении технического заказчика всегда есть объекты, по которым проектная и исполнительная документация отсутствует, что создает значительные трудности в их эффективной эксплуатации. Технология цифрового двойника объекта строительства является одним из эффективных инструментов, который может повысить эффективность решения таких задач эксплуатации объекта строительства, как:

- мониторинг технического состояния объекта;
- планирование мероприятий по эксплуатационному содержанию;
- планирование ремонтных работ;
- общее бюджетное планирование по эксплуатации объекта.

Цифровой двойник – это цифровая копия реально существующего объекта, характеризующаяся наличием с ним двусторонних связей и позволяющая осуществлять управление реальным объектом на основании актуальной информации о нем.

Технология цифрового двойника является развитием технологии информационного моделирования для уже построенных и эксплуатируемых объектов, по которым не выполнялось информационное моделирование при проектировании и строительстве, а также отсутствует или имеется в недостаточном количестве проектная и исполнительная документация. В этом случае процесс создания и управления информацией по объекту запускается на стадии эксплуатации и может быть представлен в виде последовательности следующих этапов:

- сбор актуальных данных о характеристиках объекта строительства при помощи обследований, в частности использование современных технологий фотограмметрии и лазерного сканирования позволяет значительно повысить точность геометрических параметров цифрового двойника;
- обработка полученных данных и параметрическое трехмерное моделирование объекта строительства при помощи соответствующих систем автоматизированного проектирования;
- мониторинг изменений характеристик объекта строительства с последующей актуализацией цифрового двойника (непрерывное взаимодействие цифрового двойника и реального объекта).

В случае применения технологии цифрового двойника при эксплуатации искусственных сооружений на автомобильных дорогах процесс работы с цифровой моделью можно представить следующим образом:

- анализ имеющейся проектной и исполнительной документации по мосту, выполнение детального обследования с целью определения фактических геометрических характеристик сооружения и физико-механических характеристик материалов;
- создание цифровой модели местности и трехмерное параметрическое моделирование сооружения при помощи систем автоматизированного проектирования с пространственной привязкой координат;
- внесение изменений в информационную модель сооружения по результатам текущих осмотров, плановых, маршрутных и специальных обследований;
- использование модели при необходимости выполнения проектно-изыскательских работ в случае капитального ремонта и реконструкции сооружения с последующей корректировкой модели по результатам выполнения строительных работ.

В зависимости от объема решаемых задач выделяют пять уровней зрелости технологии цифрового двойника. Охарактеризуем их и рассмотрим с учетом применимости к процессу эксплуатации автомобильных мостов.

1-й уровень: **описательный двойник** – редактируемая трехмерная параметрическая модель, которая используется как база данных по реальному объекту.

Цифровой двойник используется для решения задач по централизованному сбору всей информации по автомобильному мосту, а также задач по принятию управленческих решений по объекту, основываясь на максимально возможном массиве информации.

2-й уровень: **информативный двойник** – информационная модель, для которой обмен информацией с реальным объектом происходит в режиме реального времени при помощи соответствующих элементов (датчиков) автоматизированных систем наблюдения за параметрами объекта, которые расположены на самом объекте.

Могут решаться задачи по мониторингу в режиме реального времени технического состояния элементов внеклассовых и уникальных мостов, которые относятся к сооружениям с повышенным уровнем ответственности. Также могут решаться задачи мониторинга технического состояния мостов, находящихся в аварийном состоянии.

3-й уровень: **прогнозный двойник** – информационная модель, для которой реализованы различные программы прогноза изменения отдельных параметров реального объекта во времени на основании поступающей информации с объекта.

Могут использоваться существующие методики прогнозирования остаточного срока службы элементов автодорожных мостов для автоматизированного определения ресурса как отдельных элементов моста, так и всего сооружения в целом, по данным осмотров и обследований с целью выбора дальнейшей стратегии эксплуатации объекта.

4-й уровень: **комплексный двойник** – информационная модель, для которой реализованы механизмы стимулирования различных режимов воздействия на объект и моделирования различных сценариев управления его техническим состоянием.

Могут решаться задачи по моделированию изменения основных технико-эксплуатационных характеристик автодорожных мостов (грузоподъемность, несущая способность, пропускная способность, уровень безопасности движения транспортных средств и пешеходов) при различных внешних воздействиях и уровнях эксплуатационного содержания. Это позволит разрабатывать рациональные стратегии финансирования процесса эксплуатации сооружения.

5-й уровень: **автономный двойник** – информационная модель, для которой реализованы механизмы технологии машинного обучения с целью автоматического управления объектом по результатам данных, получаемых с объекта в реальном времени.

По мере развития средств программного обеспечения в строительстве в перспективе следует готовить дорожную отрасль к таким сценариям процесса эксплуатации автомобильных дорог и сооружений на них, при которых наивысшая степень эффективности управления состоянием дорожной сети будет реализована при помощи самообучаемых автоматических систем управления сооружениями. В этом случае роль человека сводится к настраиванию и периодическому контролю работы системы, а непосредственно функции сбора информации, актуализации модели сооружения, моделирования различных сценариев эксплуатации с последующим выбором наиболее рациональных управленческих решений для достижения максимальной технико-экономической эффективности использования объекта будут осуществляться в автоматическом режиме.

## ВЫВОДЫ

Технология информационного моделирования является перспективным организационно-управленческим инструментом, который может помочь в решении большого числа задач в строительной отрасли. Рациональная область применения ТИМ в настоящее время является предметом большого числа как теоретических, так и практических исследований. В данной работе была предпринята попытка в первом приближении теоретически обосновать перспективные пути дальнейших исследований возможностей ТИМ в области эксплуатации существующих автодорожных мостов.

Для решения задач собственников и организаций, эксплуатирующих автодорожные мосты, ТИМ может использоваться для создания цифровых моделей (цифровых двойников) существующих объектов. Цифровой двойник разрабатывается при помощи соответствующих систем автоматизированного проектирования по результатам анализа имеющейся проектной и исполнительной документации, а также по результатам натурных обследований и испытаний сооружения, являясь, таким образом, электронной копией существующего объекта с минимальным отклонением параметров сооружения от их реальных значений.

Полученная цифровая модель сооружения может быть использована в первую очередь как база данных, в которой аккумулируется вся информация о текущем состоянии объекта, отслеживается история изменения параметров технического состояния во времени, чтобы на основании этой информации принимать обоснованные управленческие решения. Еще одним достоинством цифрового двойника является возможность моделирования режимов воздействий на него различных эксплуатационных факторов (воздействия внешней среды, нагрузки, ремонтные мероприятия и т. д.) для всесторонней оценки рисков, возникающих при управлении сооружением.

В развитие данной работы авторами планируется в качестве следующего этапа исследований выполнить сбор исходных данных по эксплуатируемому автодорожному мосту с последующим созданием трехмерной параметрической модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». – Текст : электронный // Безопасные и качественные автомобильные дороги : официальный портал. – 2020. – URL: <https://bkdrf.ru/uploads/doc/паспорт%20национального%20проекта.pdf> (дата обращения: 25.12.2020).
2. Одобрена программа ремонта и строительства аварийных мостов и путепроводов. – Текст : электронный // Министерство транспорта Российской Федерации : официальный сайт. – 2020. – URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9432> (дата обращения: 25.12.2020).
3. О проведении работы по анализу ранее представленной информации в части перечня строительства (реконструкции) путепроводов в местах одноуровневых пересечений железнодорожных путей и автомобильных дорог регионального или межмуниципального и местного значения. – Текст : электронный // Федеральное дорожное агентство : официальный сайт. – 2020. – URL: <https://rosavtdor.gov.ru/about/upravlenie-fda/upravlenie-regionalnogo-gazvitiya-i-realizacii-nacionalnogo-proekta/regionalnoe-gazvitie/bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi/federalnyj-proekt-mosty-i-puteprovody/307291> (дата обращения: 25.12.2020).
4. Дороги 2020. – Текст : электронный // Безопасные и качественные автомобильные дороги : официальный портал. – 2020. – URL: <http://dorogi2020.bkdrf.ru> (дата обращения: 25.12.2020).
5. СП 328.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели = Building information modeling. Components. Guidelines and requirements : свод правил : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 15 декабря 2017 г. N 1674/пр : введен впервые : дата введения 2018-06-16 / разработан АО «НИЦ "Строительство"» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : Минстрой России, 2017. – IV, 14 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.

Получена 20.01.2021

Д. І. БОРОДАЙ, О. О. СЕМЕНОВ, В. В. ФЕДОТОВ, В. В. ЛУЧКОВ  
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІНФОРМАЦІЙНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ЕКСПЛУАТОВАНИХ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ  
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**Анотація.** У роботі виконано аналіз проблеми управління технічним станом автодорожніх мостів, що експлуатуються. Показано, що не менше 7 % мостів на автомобільних дорогах місцевої мережі знаходяться в аварійному або у передаварійному стані. Запропоновано в умовах недостатності актуальної інформації щодо технічного стану експлуатованих автодорожніх мостів з метою оптимізації процесу прийняття управлінських рішень застосовувати технологію інформаційного моделювання. Для існуючих мостів пропонується використовувати технологію розробки цифрових двійників споруд. Наводиться опис технології цифрових двійників об'єктів будівництва. Приводяться рекомендації з використання цифрових двійників при вирішенні завдань в області експлуатації автодорожніх мостів.  
**Ключові слова:** експлуатація автодорожніх мостів, управління технічним станом мостів, технологія інформаційного моделювання, цифровий двійник.

DENIS BORODAI, OLEG SEMENOV, VLADIMIR FEDOTOV,  
VITALIY LUCHKOV  
OPPORTUNITIES FOR USING THE BIM-TECHNOLOGY FOR OPERATED  
ROAD BRIDGES  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The paper analyzes the problem of managing the technical condition of road bridges in operation. It is shown that at least 7 % of the bridges on the roads of the local network are in an emergency or pre-emergency condition. It is proposed to use the BIM-technology in order to optimize the management decision-making process in conditions of insufficient up-to-date information on the technical condition of road bridges in operation. For existing bridges, it is proposed to use the technology of creating digital counterpart of structures. A description of the technology of digital twins of construction objects is given. Recommendations are given on the use of digital twins in solving problems in the field of operation of road bridges.

**Key words:** road bridge operation, bridge technical condition management, BIM-technology, digital counterpart.

**Бородай Денис Игоревич** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность и долговечность транспортных сооружений; проектирование и конструирование дорожных одежд.

**Семенов Олег Александрович** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Федотов Владимир Владимирович** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Лучков Виталий Витальевич** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Бородай Денис Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність та довговічність транспортних споруд; проектування і конструювання дорожніх одягів.

**Семенов Олег Олександрович** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Федотов Володимир Володимирович** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Лучков Віталій Віталійович** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Borodai Denis** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability and durability of transport constructions; design and construction of road pavement.

**Semenov Oleg** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

**Fedotov Vladimir** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

**Luchkov Vitaliy** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

УДК 625.74:004.94 (470+571)

**Д. И. БОРОДАЙ, Б. С. ТОКМАКОВ, В. С. ГЕЛЬБЕТ, О. С. ЗУБЧЕНКО**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ  
ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ  
ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Аннотация.** В работе выполнен анализ опыта применения технологии информационного моделирования (ТИМ) на территории Российской Федерации на различных этапах жизненного цикла объектов дорожной инфраструктуры. Проанализированы основные проблемы практического внедрения ТИМ в дорожной отрасли. Выполнен обзор нормативно-технической литературы по вопросам применения ТИМ в дорожном строительстве. Рассмотрены современные аспекты нормативно-технического регулирования информационного моделирования в дорожной отрасли. Установлено, что существующие нормативно-технические документы по информационному моделированию не учитывают специфику проектирования и строительства автомобильных дорог как линейных объектов. Выполнен обзор дорожных объектов с практическим внедрением ТИМ. Установлено, что выполнение пилотных проектов внедрения ТИМ в дорожной отрасли ограничено разработкой и использованием информационных моделей автомобильных дорог на стадии проектирования.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, жизненный цикл, технология информационного моделирования, система автоматизированного проектирования автомобильных дорог.

**ПОСТАНОВКА НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ ЗАДАЧИ**

Наблюдаемые в последние десятилетия в современном мире стремительные цифровые преобразования во всех сферах жизни человека ставят новые задачи цифровизации всех отраслей промышленности, в том числе и строительства. В соответствии с Поручением Президента Российской Федерации от 19 июля 2018 г. № ПР-1235 «О первоочередных задачах по модернизации строительной отрасли и повышению качества строительства» [1] предполагается скорейшее достижение следующих целей:

- переход к системе управления жизненным циклом объектов капитального строительства путем внедрения технологий информационного моделирования;
- внедрение стандартов информационного моделирования, а также гармонизация ранее принятых нормативно-технических документов с международным и российским законодательством;
- формирование библиотек типовой проектной документации для информационного моделирования;
- подготовку специалистов в сфере информационного моделирования в строительстве;
- стимулирование разработки и использования отечественного программного обеспечения для информационного моделирования зданий и сооружений.

В качестве основного инструмента цифровизации в строительстве предлагается использовать технологию информационного моделирования (ТИМ) или BIM-технологию.

ТИМ в строительстве в последнее десятилетие все чаще используется участниками процесса проектирования, строительства и эксплуатации объектов капитального строительства, в том числе и транспортной инфраструктуры. Согласно современным представлениям применение ТИМ следует соотносить с процессом управления жизненным циклом объекта строительства с целью обеспечения его безопасного использования на протяжении всего срока службы при минимуме приведенных

затрат. В этом случае использование ТИМ на различных этапах жизненного цикла объекта позволяет экономить трудовые, материальные и временные ресурсы, а также повышает надежность самого объекта.

В процессе реализации поставленных целей Правительством Российской Федерации были разработаны «Правила формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства» [2]. В сфере дорожного строительства Министерством транспорта установлено, что с 1 января 2021 года подготовка проектной документации в отношении объектов транспортной инфраструктуры, в том числе автомобильных дорог, строительство, реконструкция которых финансируется за счет средств федерального бюджета и внебюджетных источников, осуществляется с использованием технологии информационного моделирования [3].

Однако, несмотря на значительное внимание государства к проблеме развития технологии информационного моделирования в строительстве, дорожная отрасль находится только в начале пути освоения этого инструмента, который должен помочь в решении задач по развитию и управлению транспортной инфраструктурой.

Для совершенствования процесса управления дорожными объектами при помощи ТИМ важным является анализ накопленного опыта практического внедрения ТИМ различными участниками процесса создания и использования объектов дорожной инфраструктуры (заказчиками, проектно-исследовательскими, экспертными, строительными и эксплуатирующими организациями) на различных стадиях жизненного цикла этих объектов.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является анализ и обобщение опыта российских участников процесса жизненного цикла автомобильных дорог в вопросах применения технологии информационного моделирования.

Задачами исследования являются:

- анализ нормативно-технической литературы по применению ТИМ в дорожном строительстве;
- анализ опыта пилотного внедрения ТИМ на объектах транспортного строительства.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время разработаны и введены в действие только общестроительные стандарты и своды правил, которые постоянно подвергаются пересмотру и совершенствованию и направлены на управление процессами информационного моделирования объектов промышленного и гражданского строительства. Для автомобильных дорог такие документы еще не разработаны.

Попытка учесть специфику линейных объектов и облегчить внедрение ТИМ на объектах федеральной дорожной сети предпринята Федеральным дорожным агентством «Росавтодор» при разработке отраслевых рекомендаций ОДМ 218.3.105-2018 «Методические рекомендации по организации взаимодействия участников разработки проектной и рабочей документации на пилотных проектах строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог с применением BIM-технологии» [4]. Документ содержит рекомендации по организации взаимодействия участников разработки проектной и рабочей документации, требования к дополнительным разделам технического задания на выполнение этих работ на пилотных проектах строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог.

Документ описывает особенности организации совместной работы над информационной моделью со стороны Заказчика и Проектировщика на стадии проектирования, уточняет требования к формированию информационной модели, а также вводит базовый классификатор элементов информационных моделей автомобильных дорог.

Еще до появления общестроительных норм на информационное моделирование одним из лидеров отрасли в сфере внедрения инноваций Государственной компанией «Автодор» был введен в действие в 2016 году стандарт организации СТО АВТОДОР 8.6-2016 «Организация и технологическая поддержка процессов формирования информационных моделей автомобильных дорог на всех этапах жизненного цикла» [5].

Стандарт определяет единый порядок разработки и использования информационных моделей автомобильных дорог в ГК «Автодор». Документ устанавливает требования к составу информационных моделей, требования к координатному обеспечению, а также к среде общих данных и формату обмена данными из информационных моделей. Важной особенностью является наличие требований



к формату данных модели, которые должны передаваться на этапе строительства в системы автоматизированного управления дорожно-строительными машинами, а также на этапе эксплуатации автомобильных дорог ГК «Автодор».

Согласно данным ГК «Автодор» на лето 2019 г. [6] по заказу Государственной компании было разработано 12 информационных моделей по разным объектам: новое строительство, капитальный ремонт, надземные пешеходные переходы. В работе находилось порядка 19 моделей.

В работе [7] авторами выполнен всесторонний анализ мероприятий нормативно-правового и нормативно-технического регулирования в сфере информационного моделирования. Авторами отмечено, что на законодательном уровне в Российской Федерации уже устранены барьеры на пути широкого внедрения ТИМ в сферу строительства, что, однако, является необходимым, но не достаточным условием успешного перехода к новой технологии создания объектов строительства в дорожной отрасли и их эффективным управлением при эксплуатации.

Анализируя итоги работы Минстроя России в области стандартизации применения ТИМ, авторы приводят интересные данные компании «Конкуратор» по исследованию уровня применения ТИМ в Российской Федерации, которые свидетельствуют о том, что с 2017 г. по 2019 г. уровень применения ТИМ в строительстве оставался практически неизменным на уровне 22 % от общего числа опрошенных организаций. При этом доля объектов дорожного хозяйства в общем числе объектов с применением ТИМ составляет 4 %.

Сложности с внедрением ТИМ на дорожных объектах авторы видят в первую очередь в том, что подготовленные Минстроем нормативно-технические документы по информационному моделированию не учитывают специфику проектирования и строительства автомобильных дорог как линейных объектов. В результате совместной работы специалистов ФАУ «РОСДОРНИИ», «С-Инфо», «ИндорСофт» и Института «Теринформ» были разработаны проекты ПНСТ «Дороги автомобильные общего пользования. Правила формирования информационных моделей на различных стадиях жизненного цикла» и «Дороги автомобильные общего пользования. Правила описания компонентов информационного моделирования», где сформулированы предложения по разработке научно обоснованной перспективной структуры, состава и содержания комплекса нормативных технических документов в области информационного моделирования автомобильных дорог, отвечающих специфике и потребностям системы управления цифровыми данными для создания и эксплуатации объектов дорожной отрасли.

Главный посыл авторов в решении проблемы стандартизации информационного моделирования заключается в том, что в основе всего процесса цифрового развития дорожной отрасли должны лежать специфические управленческие задачи отрасли, а ТИМ является информационно-технологическим инструментом, который должен быть настроен на решение задач эффективного управления дорожными активами.

В работе [8] авторы описывают опыт применения элементов технологии информационного моделирования при проектировании объекта «Капитальный ремонт автомобильной дороги М-5 «Урал» Москва – Рязань – Пенза – Самара – Уфа – Челябинск, подъезд к г. Екатеринбург на участке км 79+899 – км 121+509, Челябинская область». Объект был одним из пилотных проектов, в котором специалисты ООО «Дороги Приволжья» совместно со специалистами НПФ «Топоматик» апробировали удаленное взаимодействие между проектным институтом и Заказчиком в лице ФКУ Упрдор «Южный Урал», реализуемое размещением информационной модели объекта в прототипе среды общих данных и организации двустороннего доступа.

Механизм удаленного взаимодействия заключался в следующем: специалистам технического отдела Заказчика был открыт доступ к среде общих данных, размещенной на интернет-сервере Проектировщика ООО «Дороги Приволжья». Это позволило представителям Заказчика осуществлять ежедневный контроль хода проектирования объекта по ежедневно обновляемой информационной модели, а также передавать замечания по результатам проверки модели через систему динамических аннотаций.

Согласно оценкам реализации пилотного проекта было отмечено, что при использовании ТИМ по сравнению со стандартной технологией проектирования было зафиксировано сокращение сроков производства проектных работ в 5,48 раза, а работ по внесению изменений в проектную документацию – в 4 раза.

Согласно сообщению на сайте одного из российских разработчиков программного обеспечения «ИндорСофт» [9] специалисты компании разработали информационную модель участка автомобильной

дороги М-12, которая является частью международного транспортного маршрута «Европа – Западный Китай».

Внедрение информационного моделирования осуществлялось с целью повышения эффективности управления жизненным циклом строящегося объекта, находящегося в ведении Госкомпании «Автодор». Целью работ было использование информационной модели для обоснования инвестиций, оптимизации проектно-изыскательских работ, ускорения разработки проектно-сметной документации.

Проектные решения выполнялись АО «Союздорпроект» с использованием нескольких систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог. Проектирование 5-го этапа выполнялось в системе «Топоматик Robur – Автомобильные дороги», а 6-го и 7-го этапов – в системе IndorCAD. Для объединения проектных решений была выбрана система IndorCAD. В ней эти решения были собраны в единое координатное пространство и согласованы друг с другом.

По оценкам авторов созданная модель позволит аккумулировать информацию для многократного использования широкого кругом специалистов на разных этапах жизненного цикла транспортно-го объекта.

## ВЫВОДЫ

Анализ опыта российских организаций, которые являются участниками процесса жизненного цикла автомобильных дорог, в вопросах применения ТИМ показал наличие большого числа актуальных проблем на пути цифровой модернизации дорожной отрасли. Дорожная отрасль делает только первые шаги в вопросах применения технологии информационного моделирования. Наблюдаемые незначительные объемы внедрения ТИМ на объектах дорожного строительства обусловлены комплексом объективных факторов, что в свою очередь создает обширное поле для исследований, направленных на разработку и модернизацию механизмов внедрения ТИМ в дорожную деятельность с целью развития транспортной инфраструктуры в соответствии с современными тенденциями цифровизации экономики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д. А. Медведеву, Поручение Президента Российской Федерации от 19 июля 2018 г. № ПР-1235 «О первоочередных задачах по модернизации строительной отрасли и повышении качества строительства». – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации : [сайт]. – 2020. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/550966183> (дата обращения: 25.12.2020).
2. Правительство Российской Федерации. Постановление от 15 сентября 2020 г. № 1431 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов, а также о внесении изменения в пункт 6 Положения о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства». – Текст : электронный // Правительство России : официальный сайт]. – 2020. – URL: <http://static.government.ru/media/files/idDNOkiiAZnlmOLkgjyqNR7I9mOq4PFt.pdf> (дата обращения: 25.12.2020).
3. Министерство транспорта Российской Федерации. Распоряжение от 17 сентября 2020 года № АК-177-р «О подготовке проектной документации с использованием технологии информационного моделирования». – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации : [сайт]. – 2020. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/566418292> (дата обращения: 25.12.2020).
4. ОДМ 218.3.105-2018. Методические рекомендации по организации взаимодействия участников разработки проектной и рабочей документации на пилотных проектах строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог с применением BIM-технологии : отраслевой дорожный методический документ : издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 05.06.2018 № 2084-р : введен впервые / разработан акционерным обществом «Институт "Стройпроект"» (АО «Институт "Стройпроект"») при участии общества с ограниченной ответственностью «С-ИНФО» (ООО «С-ИНФО») и общества с ограниченной ответственностью «ИндорСофт» (ООО «ИндорСофт»). – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2020. – IV, 69 с. – Текст : непосредственный.
5. СТО АВТОДОР 8.6-2016. Организация и технологическая поддержка процессов формирования информационных моделей автомобильных дорог на всех этапах жизненного цикла = Organizational and technological maintenance of road information modeling on all stages of road lifecycle : стандарт Государственной компании «Автодор» : утвержден и введен в действие Приказом Государственной компании «Российские автомобильные дороги» от 07 апреля 2016 г. № 44 : введен впервые : дата введения 2016-04-07 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Автодор-Инжиниринг» и обществом с ограниченной ответственностью «ИндорСофт». – Москва : б. и., 2016. – 48 с. – Текст : непосредственный.

6. Дорожные объекты будут создавать и эксплуатировать с применением цифровых технологий. – Текст : электронный // Государственная компания «Российские автомобильные дороги» : официальный сайт. – 2020. – URL: <https://russianhighways.ru/press/news/59800/> (дата обращения: 25.12.2020).
7. Носов, Е. А. О решении задач развития нормативно-технической базы информационного моделирования автомобильных дорог в современных условиях / Е. А. Носов, М. В. Дорофеев, В. П. Миронюк. – Текст : электронный // Сборник научных трудов ФАУ «РОСДОРНИИ» «Дороги и мосты». – 2019. – Выпуск 42. – С. 21–32. – URL: <https://rosdornii.ru/upload/iblock/9db/2-O-RESHENII-ZADACH-RAZVITIYA-NORMATIVNO-TEKHNICHESKOY-BAZY-INFORMATSIONNOGO-MODELIROVANIYA-AVTOMOBILNYKH-DOROG-V-SOVREMENNYKH-USLOVIYAKH.pdf> (дата обращения: 30.12.2020).
8. Глызин, Д. В. Опыт применения элементов технологии информационного моделирования на примере объекта на участке автомобильной дороги М-5 «Урал» / Д. В. Глызин, Д. П. Курдюков, А. А. Вершков. – Текст : электронный // Сборник научных трудов ФАУ «РОСДОРНИИ» «Дороги и мосты». – 2019. – Выпуск 42. С. 47–55. – URL: [https://rosdornii.ru/upload/iblock/a90/4-OPYT-PRIMENENIYA-ELEMENTOV-TEKHOLOGII-INFORMATSIONNOGO-MODELIROVANIYA-NA-PRIMERE-OBEKTA-NA-UCHASTKE-AVTOMOBILNOY-DOROGI-M\\_5.pdf](https://rosdornii.ru/upload/iblock/a90/4-OPYT-PRIMENENIYA-ELEMENTOV-TEKHOLOGII-INFORMATSIONNOGO-MODELIROVANIYA-NA-PRIMERE-OBEKTA-NA-UCHASTKE-AVTOMOBILNOY-DOROGI-M_5.pdf) (дата обращения: 30.12.2020).
9. ИндорСофт участвует в самом масштабном на текущий момент дорожном проекте страны. – Текст : электронный // ИндорСофт : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.indorsoft.ru/about/news/57529/> (дата обращения: 30.12.2020).

Получена 21.01.2021

Д. І. БОРОДАЙ, Б. С. ТОКМАКОВ, В. С. ГЕЛЬБЕТ, О. С. ЗУБЧЕНКО  
РОСІЙСЬКИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ  
ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОБ'ЄКТАХ ДОРОЖНЬОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У роботі виконано аналіз досвіду застосування технології інформаційного моделювання (ТІМ) на території Російської Федерації на різних етапах життєвого циклу об'єктів дорожньої інфраструктури. Проаналізовано основні проблеми практичного впровадження ТІМ у дорожній галузі. Виконано огляд нормативно-технічної літератури з питань застосування ТІМ у дорожньому будівництві. Розглянуто сучасні аспекти нормативно-технічного регулювання інформаційного моделювання в дорожній галузі. Встановлено, що існуючі нормативно-технічні документи з інформаційного моделювання не враховують специфіку проектування та будівництва автомобільних доріг як лінійних об'єктів. Виконано огляд дорожніх об'єктів з практичним впровадженням ТІМ. Встановлено, що виконання пілотних проектів впровадження ТІМ у дорожній галузі обмежено розробкою та використанням інформаційних моделей автомобільних доріг на стадії проектування.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, життєвий цикл, технологія інформаційного моделювання, система автоматизованого проектування автомобільних доріг.

DENIS BORODAI, BOGDAN TOKMAKOV, VLADIMIR GELBET, OLESYA  
ZUBCHENKO  
RUSSIAN EXPERIENCE IN APPLYING THE BIM-TECHNOLOGY ON THE  
ROAD INFRASTRUCTURE FACILITIES  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The paper analyzes the experience of using BIM-technology on the territory of the Russian Federation at various stages of the life cycle of road infrastructure objects. The main problems of the practical implementation of BIM-technology in the road industry are analyzed. A review of the normative and technical literature on the use of BIM-technology in road construction is performed. Modern aspects of regulatory and technical regulation of information modeling in the road industry are considered. It is established that the existing normative and technical documents on information modeling do not take into account the specifics of the design and construction of highways as linear objects. The review of road objects with the practical implementation of BIM-technology is carried out. It is established that the implementation of pilot BIM projects in the road industry is limited to the development and use of road information models at the design stage.

**Key words:** road, life-cycle, BIM-technology, road computer-aided design system.

**Бородай Денис Игоревич** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность и долговечность транспортных сооружений; проектирование и конструирование дорожных одежд.

**Токмаков Богдан Сергеевич** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Гельбет Владимир Сергеевич** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Зубченко Олеся Сергеевна** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: мониторинг технического состояния автодорожных мостов.

**Бородай Денис Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг і аеродромів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність та довговічність транспортних споруд; проектування і конструювання дорожніх одягів.

**Токмаков Богдан Сергійович** – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Гельбет Володимир Сергійович** – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Зубченко Олеся Сергіївна** – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: моніторинг технічного стану автодорожніх мостів.

**Borodai Denis** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability and durability of transport constructions; design and construction of road pavement.

**Tokmakov Bogdan** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

**Gelbet Vladimir** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

**Zubchenko Olesya** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: monitoring of the technical condition of road bridges.

## СОДЕРЖАНИЕ

БРАТЧУН В. И., БЕСПАЛОВ В. А., НАРИЖНАЯ О. Н., ДЕМЕШКИН В. П., РАДЮКОВА Э. Л. О целесообразности активации поверхности минерального порошка бетонов на органических вяжущих растворами олигомеров и полимеров	5
БРАТЧУН В. И., ЖЕВАНОВ В. В., РОМАСЮК Е. А., БАЛЕВ Д. О., ЕГОРКИН Б. А., КОЛПАКОВ Д. Ю., ПУСТОВОЙ А. С. Проектирование состава влажного асфальтополимер-шлакобетона, характеризующегося оптимальным сочетанием коагуляционно-кристаллизационных контактов	15
КИЦЕНКО Т. П., МАЛИНИН Д. Г., ТИМОШЕНКО Е. А. Оптимизация состава алюмосиликатных вяжущих композиций на основе шамотно-каолиновой пыли	27
КИБЗУН В. Н., НАГОРНАЯ Н. П. Сегментация потребителей меховых изделий в торговом предприятии и прогнозирование спроса на них	34
КОЧЕРГИН Ю. С., ЗОЛОТАРЕВА В. В. Структура и свойства смеси эпоксидного полимера с блок-сополимером полибутилентерефталат-политетраметиленоксид	43
ГУБА К. Р., КУЛИКОВ В. Н., ГАБИДУЛИН Э. Н., КОВШИК Н. А., ГУРИН А. Д., БОРИСОВ С. Г. Анализ способов модификации органического вяжущего	53
САМОЙЛОВА Е. Э., БРАТЧУН В. И., ГУЛЯК Д. В., ДОЛЯ А. Г. Физико-химические процессы при модификации дорожного битума термополимером – «Элвалой АМ» в комплексе с полифосфорной кислотой	60
ЗАГОРОДНЯЯ А. В. Методика исследования стабильности битумополимерных вяжущих при хранении	68
ЕГОРОВА Е. В., БОРОДАЙ Е. Т., КОРЧАГИНА К. А., ВОДОЛАД М. Н., ВОРОНЕНКО М. Э. Самоуплотняющийся бетон с комплексной добавкой на основе отходов промышленности Донбасса	74
ПШЕНИЧНЫХ О. А., ПОЖИДАЕВА А. Л., МИХАЙЛЮК Д. С., РАКУЛЕНКО А. А., СЕРЕДА Р. Э. Армирование асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами	80
ФРОЛОВА С. А., СОБОЛЬ О. В., СОБОЛЕВ А. Ю. Определение кинетических параметров равновесной и неравновесной кристаллизации висмута по термограммам	87
БЕСПАЛОВ В. Л., КУЗЬМИНЫХ А. В., МАКСЮЧЕНКО В. Л., МАКСЮЧЕНКО С. Л., БЕЛИНСКИЙ Д. Э. Атмосферостойкость комплексно-модифицированных асфальтополимербетонов	93
БЕСПАЛОВ В. Л., БЛЕДНОВ О. В., ДЗЮБА А. С., КИЧИГИН В. Ю., ФИЩУК В. В., ШКОДА И. Н. Модифицированные органические вяжущие с использованием вторичного кубового остатка фенольно-ацетонового производства	101
СОХИНА С. И., ШЕВЧЕНКО О. Н., МУКОНИНА Е. В. О возможности использования нитро-, аминоксодержащих смолистых отходов при подготовке металлической поверхности под окраску	107
ЩЕБЕТОВСКАЯ Н. В., ПОКИНТЕЛИЦА Е. А., АЛЕКСАНДРОВА О. В. Теплофизические особенности плавления и кристаллизации органических теплоаккумулирующих материалов	114
БОРОДАЙ Д. И., СЕМЕНОВ О. А., ФЕДОТОВ В. В., ЛУЧКОВ В. В. Перспективы использования технологии информационного моделирования для эксплуатируемых автодорожных мостов	120
БОРОДАЙ Д. И., ТОКМАКОВ Б. С., ГЕЛЬБЕТ В. С., ЗУБЧЕНКО О. С. Российский опыт применения технологии информационного моделирования на объектах дорожной инфраструктуры	126

Статьи, публикуемые в журнале «Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры», размещены

- в российской информационно-аналитической системе – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- в электронно-библиотечной системе IPRbooks
- в информационно-поисковой системе Google Scholar.

ISSN 2519-2817 online

## ЗМІСТ

БРАТЧУН В. І., БЕСПАЛОВ В. Л., НАРИЖНА О. М., ДЕМЕШКІН В. П., РАДЮКОВА Е. Л. Про доцільність активації поверхні мінерального порошку бетонів на органічних в'язучих розчинами олігомерів та полімерів	5
БРАТЧУН В. І., ЖЕВАНОВ В. В., РОМАСЮК Є. О., БАЛЄВ Д. О., ЄГОРКІН Б. О., КОЛПАКОВ Д. Ю., ПУСТОВИЙ О. С. Проектування складу вологого асфальтополімершлакобетону, що характеризується оптимальним поєднанням коагуляційно-кристалізаційних контактів	15
КІЦЕНКО Т. П., МАЛИНІН Д. Г., ТИМОШЕНКО К. О. Оптимізація складу алюмосилікатних в'язучих композицій на основі шамотно-каолінового пилу	27
КІБЗУН В. М., НАГОРНА Н. П. Сегментація споживачів хутряних виробів у торговому підприємстві та прогнозування попиту на них	34
КОЧЕРГІН Ю. С., ЗОЛОТАРЬОВА В. В. Структура і властивості суміші епоксидного полімеру з блок-сополімером полібутилентерефталат-політетраметиленоксид	43
ГУБА К. Р., КУЛИКОВ В. М., ГАБІДУЛІН Е. Н., КОВШИК Н. А., ГУРІН О. Д., БОРИСОВ С. Г. Аналіз способів модифікації органічного в'язучого	53
САМОЙЛОВА О. Е., БРАТЧУН В. І., ГУЛЯК Д. В., ДОЛЯ А. Г. Фізико-хімічні процеси в бітумі при його модифікації термополімером «Елвалоєм АМ» у комплексі з поліфornoю кислотою	60
ЗАГОРОДНЯ А. В. Методика дослідження стабільності бітумополімерних в'язучих при зберіганні	68
ЄГОРОВА О. В., БОРОДАЙ К. Т., КОРЧАГНА К. О., ВОДОЛАД М. М., ВОРОНЕНКО М. Е. Бетон, що самоущільнюється, з комплексною добавкою на основі відходів промисловості Донбасу	74
ПШЕНИЧНИХ О. О., ПОЖИДАЄВА А. Л., МИХАЙЛЮК Д. С., РАКУЛЕНКО О. О., СЕРЕДА Р. Е. Армування асфальтобетонних сумішей синтетичними волокнами	80
ФРОЛОВА С. О., СОБОЛЬ О. В., СОБОЛЄВ О. Ю. Визначення кінетичних параметрів рівноважної і нерівноважної кристалізації вісмуту за термограмою	87
БЕСПАЛОВ В. Л., КУЗЬМІНИХ А. В., МАКСЮЧЕНКО В. Л., МАКСЮЧЕНКО С. Л., Д. Е. БЕЛІНСЬКИЙ Атмосферостійкість комплексно-модифікованих асфальтополімербетонів	93
БЕСПАЛОВ В. Л., О. В. БЛЕДНОВ, ДЗЮБА О. С., КИЧИГИН В. Ю., ФІЩУК В. В., ШКОДА І. М. Модифіковані органічні в'язучі з використанням вторинного кубового залишку фенольно-ацетонового виробництва	101
СОХІНА С. І., ШЕВЧЕНКО О. М., МУКОНІНА М. Про можливість використання нітро- і аміновмісних смолистих відходів при підготовці металевої поверхні під забарвлення	107
ЩЕБЕТОВСЬКА Н. В., ПОКИНТЕЛИЦЯ О. А., АЛЕКСАНДРОВА О. В. Теплофізичні особливості плавлення і кристалізації органічних теплоакумулювальних матеріалів	114
БОРОДАЙ Д. І., СЕМЕНОВ О. О., ФЕДОТОВ В. В., ЛУЧКОВ В. В. Перспективи використання технології інформаційного моделювання для експлуатованих автодорожніх мостів	120
БОРОДАЙ Д. І., ТОКМАКОВ Б. С., ГЕЛЬБЕТ В. С., ЗУБЧЕНКО О. С. Російський досвід використання технології інформаційного моделювання на об'єктах дорожньої інфраструктури	126

Статті, що публікуються у журналі «Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури», розміщені

- в російській інформаційно-аналітичній системі – Російський індекс наукового цитування (РІНЦ)
- в електронно-бібліотечній системі IPRbooks
- в інформаційно-пошуковій системі Google Scholar.

---

## CONTENTS

BRATCHUN VALERY, BESPALOV VITALY, NARYGNAYA OLGA, DEMESCHKIN VALENTIN, RADYUKOVA ELINA. About the Appropriateness of the Activation of the Surface of a Mineral Concrete Powder on Organic Binders with Oligomers and Polymers	5
BRATCHUN VALERY, ZHEVANOV VYACHESLAV, ROMASYUK EVGENY, BALEV DMITRY, EGORKIN BOGDAN, KOLPAKOV DMITRY, PUSTOVOY ALEXANDER. Designing the Composition of Wet Asphalt Polymer-Slag Concrete Characterized by the Optimal Combination of Coagulation-Crystallization Contacts	15
KITSENKO TATYANA, MALININ DENIS, TIMOSHENKO CATHERINE. Optimization of the Composition of Aluminosilicate Binders Based on Chamotte-Kaolin Dust	27
KIBZUN VALENTINA, NAGORNAYA NINA. Segmentation of Consumers of fur Products in a Commercial Enterprise and Forecasting Demand for them	34
KOCHERGIN YURIY, ZOLOTAREVA VIKTORIYA. Structure and Properties of a Mixture of an Epoxy Polymer with a Block Copolymer Polybutylene Terephthalate-Poly-Tetramethylene Oxide	43
GUBA KONSTANTIN, KULIKOV VLADISLAV, GABIDULIN ELDAR, KOVSHIK NATALYA, GURIN ALEXANDER, BORISOV SERGEI. Analysis of methods for modifying organic binder	53
SAMOJLOVA HELEN, BRATCHUN VALERY, GULYAK DENIS, DOLYA ANATOLIY. The Likely Chemical Processes in the Bitumen with its Modifications by «Elvaloy AM» in the Presence Polyphosphorous Acid	60
ZAGORODNYAYA ANASTASIA. On Complex Modification of Asphalt Concrete Microstructure by Divinyl-Styrene Thermoelastoplastic	68
EGOROVA ELENA, BORODAY EKATERINA, KORCHAGINA KARINA, VODOLAD MAXIM, VORONENKO MAXIM. Self-Compacting Concrete with a Complex Additive Based on Industrial Waste from Donbass	74
PSHENICHNYKH OLEG, POZHIDAEVA ALLA, MIKHAILYUK DANIL, RAKULENKO ALEXANDER, SEREDA RODION. Reinforcement of Asphalt Concrete Mixtures with Synthetic Fibers	80
FROLOVA SVETLANA, SOBOL OKSANA, SOBOLEV ALEKSANDR. Determination of the Kinetic Parameters of Equilibrium and Nonequilibrium Crystallization of Bismuth from Thermograms	87
BESPALOV VITALY, KUZMINYKH ANDREI, MAKSYUCHENKO VLADISLAV, MAKSYUCHENKO STANISLAV, BELINSKY DEMYAN. Weather Resistance of Complex-Modified asphalt-polymer concretes	93
BESPALOV VITALY, BLEDNOV OLEG, DZUBA ALEXANDER, KICHIGIN VLADISLAV, FISHCHUK VLADISLAV, SKODA IGOR. Modified Organic Binders With the use of Secondary Cubic Residue of Phenolic-Acetone Production	101
SOKHINA SVETLANA, OLGA SHEVCHENKO, MUKONINA ELENA. On the Possibility of Using Nitro-, Amino-Containing Resinous Waste in the Preparation of a Metal Surface For Painting	107
SHCHEBETOVSKAYA NATALIYA, POKYNTELYTSIA OLENA, ALEKSANDROVA OLGA. Thermophysical Features of Melting and Crystallization of Organic Heat-Accumulating Materials	114
DENIS BORODAI, SEMENOV OLEG, FEDOTOV VLADIMIR, LUCHKOV VITALIY. Opportunities for using the BIM-Technology for Operated Road Bridges	120

The articles published in journal «Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture» are indexed by:

- the Russian Information and Analytical System – Russian Science Citation Index (RSCI)
- the electronic-library system IPRbooks
- the search engine Google Scholar.