

**Изучение адгезионных взаимодействий в системе «лёд – асфальтобетон» –
залог безопасности дорожных автотранспортных коммуникаций**

**Павел Иванович Грехов¹, Владимир Степанович Шкрабак²,
Роман Владимирович Шкрабак²**

¹Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, Курганская обл.
Кетовский р-н, пос. Лесниково, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Россия
e-mail: v.shkrabak@mail.ru

Аннотация. Развитие транспортной системы в любой стране существенно влияет на экономическое развитие. Активное развитие транспортной системы требует высококачественных дорог, так как это влияет на безопасность при их эксплуатации и особенно в период пониженных температур. В этот период дороги покрываются льдом или снежным накатом, что требует их скорейшего удаления. Качество поверхности дорожного покрытия зависит от сцепления (адгезии) льда с дорожными одеждами. В статье рассматривается вопрос адгезионных взаимодействий в системе «лед-асфальтобетон». Разработанной методикой можно определять сцепление льда с поверхностью дорожного покрытия. Это обстоятельство позволит, используя различные добавки и варьирование составом и компонентами асфальтобетона, снижать адгезионные взаимодействия. Пониженные адгезионные взаимодействия позволят более быстро удалять лёд и снежный накат, а это обеспечивает снижение количество дорожно-транспортных происшествий, что позволяет сохранить жизнь и здоровье людей. В качестве модификаторов рассматривается битумно-солевая масса, являющаяся отходом от уничтожения химического оружия фосфорорганической группы. Рассмотрен её химический состав, позволяющий обеспечивать ей эффект поверхностно-активных веществ. Эксперименты выполнены и обработаны с применением теории планирования эксперимента. Получены поверхности отклика частной выборки генеральной совокупности и закономерности, описанные регрессионными уравнениями, адекватность которых проверена критериями Фишера и Кохрана.

Ключевые слова: асфальтобетон; адгезия; транспортная система; планирование эксперимента.

Для цитирования: Грехов П. И., Шкрабак В. С., Шкрабак Р. В. Изучение адгезионных взаимодействий в системе «лёд – асфальтобетон» – залог безопасности дорожных автотранспортных коммуникаций // Аграрный научный журнал. 2023. № 3. С. 116–120. <http://10.28983/asj.y2023i3pp116-120>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**The study of adhesive interactions in the ice-asphalt concrete system is the key
to the safety of road transport communications**

Pavel I. Grekhov¹, Vladimir S. Shkrabak², Roman V. Shkrabak²

¹Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, Kurgan region. Ketovsky district, Lesnikovo, Russia

²Sankt-Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg-Pushkin, Russia
e-mail: v.shkrabak@mail.ru

Abstract. The development of the transport system in any country significantly affects economic development. The active development of the transport system requires high-quality roads, as this affects the safety of their operation and especially during low temperatures. During this period, roads are covered with ice or snow, which requires their speedy removal. The quality of the road surface depends on the adhesion of ice with road clothes. The article deals with the issue of adhesive interactions in the ice-asphalt concrete system. The developed methodology can determine the adhesion of ice to the surface of the road surface. This circumstance will allow using various additives and varying the composition and components of asphalt concrete to reduce adhesive interactions. Reduced adhesive interactions will allow to remove ice and snow more quickly, and this will reduce the number of road accidents, which will save people's lives and health. Bituminous salt mass, which is a waste



from the destruction of chemical weapons of the organophosphorus group, is considered as modifiers. Its chemical composition is considered, which makes it possible to ensure its effect of surfactants. The experiments were performed and processed using the theory of experiment planning. The response surfaces of a particular sample of the general population and the regularities described by regression equations, the adequacy of which is verified by the Fisher and Cochran criteria, are obtained.

Keywords: asphalt concrete; adhesion; transport system; experiment planning.

For citation: Grekhov P. I., Shkrabak V. S., Shkrabak R. V. The study of adhesive interactions in the ice – asphalt concrete system is the key to the safety of road transport communications // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2023;(3):116–120. (In Russ.). [http: 10.28983/asj.y2023i3pp116-120](http://10.28983/asj.y2023i3pp116-120).

Введение. Экономическое развитие любой страны зависит от объёма и скорости товарооборота. На эти показатели напрямую влияет степень развития и безопасность любого вида транспортных систем (железнодорожных, авиационных, автотранспортных и т.д.). Основными являются автотранспортные перевозки, которые составляют порядка 70 % всех грузооборотных систем [1–3]. При обеспечении интенсивного грузооборота посредством автотранспорта главную роль начинает играть дорога, как система, обеспечивающая не только высокие скоростные режимы, но и в значительной степени, безопасность всего комплекса автотранспортной системы. Вместе с тем, необходимо учитывать, что эксплуатация автодорог в Российской Федерации в значительной части времени происходит при температурах ниже нуля и значительных осадках в виде дождя, переходящего в снег и формирующего ледяную корку на поверхности дорожного полотна. Исходя из этого, дорожные службы должны в кратчайшие сроки производить удаление с поверхности дорог снежного наката и льда. Качество и скорость удаления льда и снежного наката зависит от адгезионного взаимодействия системы «лёд – асфальтобетон», но это носит не только механический характер сцепления, но и физический. Для этого необходимо рассмотреть, какое воздействие происходит на ледяную корку как при динамическом контакте колеса, так и при очистке металлическим скребком.

При динамическом воздействии колеса автомобиля происходят деформации ледяной корки в пределах упругих значений, а значит, после снятия динамической нагрузки возникают напряжения, перпендикулярные плоскости границы фаз системы «лёд – асфальтобетон», т.е. происходит работа поверхностей «на отрыв». В окрестностях периметра пятна контакта колеса с поверхностью ледяной корки возникают сдвигающие усилия, вызывающие касательные напряжения. Следовательно, возникает необходимость в определении цифровых значений сцепления льда с асфальтобетоном.

Методика исследований. Асфальтобетон является многокомпонентной системой и физико-химические взаимодействия со льдом могут регулироваться не только грамотным подбором инертных компонентов, но и различными гидрофобными модификаторами. Экспериментальные образцы асфальтобетона изготавливались и испытывались в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства».

На кафедре строительства и пожарной безопасности Курганской ГСХА разработана методика определения сцепления льда с асфальтобетоном. Она позволяет определить значения напряжений как при осевом отрыве, так и при сдвиге (касательные напряжения) с последующим сопоставлением различных физико-механических параметров.

Также необходимо учитывать, какие модифицирующие добавки вводятся в состав асфальтобетонной смеси. Наилучшим вариантом является применение добавок, относящихся к отходам техногенного или природного происхождения. Их использование приведет к улучшению экологической обстановки в местах складирования (хранения), а также к снижению себестоимости получаемой продукции и улучшению её качества. Кроме того, переработка этих отходов позволит получить дополнительные рабочие места и налоговые поступления в местный бюджет. Оптимальным вариантом, соответствующим этим показателям, является применение отходов от уничтожения химического оружия фосфорорганической группы (зарин, зоман, VX-газы). Эти отходы представляют собой битумносолевую массу (БСМ), состоящую из нефтяного битума (95–97 %) и реакционной массы (3–5 %). Этому способствует накопленное большое количество БСМ на складах (полигонах) хранения.





При рассмотрении молекулярной структуры составных элементов БСМ можно однозначно отметить, что в них присутствуют полярные группы. Наличие полярных групп позволяет реакционной массе обеспечивать проявление свойств поверхностноактивных добавок (ПАВ).

Согласно паспорту в состав БСМ входят:

- 1) фосфорсодержащая составляющая – 2,457 %:
 - а) кальциевая соль кислого эфира метилфосфоновой кислоты;
 - б) кальциевая соль метилфосфоновой кислоты;
- 2) аминоэтилизопропилметилфосфонат;
- 3) диизопропиловый эфир метилфосфоновой кислоты;
- 4) ОВ – зарин – менее $1,0 \cdot 10^{-8}$ %;
- 5) фторсоставляющая - фторид кальция (CaF_2) – 0,132 %;
- 6) битум – 97,11 %.

В молекулах реакционной массы присутствуют полярные и радикальные группы. Так, химическая пара $\text{CH}_3 - \text{P}$ присутствует во всех составляющих реакционной массы и поэтому они являются малополярными, а также содержат CH_3 -группу.

Вторая группа, входящая в состав большинства молекулярных структур реакционной массы, – изопропиловая группа $\{\text{CH}(\text{CH}_3)_2\}$.

Эти две группы растворимы в битумных частях разнофазовых систем. Особым фрагментом молекул является аминогруппа ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$) – она полярна, может образовывать соли по типу RNH_3^+X^- .

Присутствует группа $\{\text{P}=\text{O}\}$, являющаяся полярной, которая будет взаимодействовать с минеральной частью смесей.

Группа $\{-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\}$ является сильнополярной со связью, близкой к ионной, и будет взаимодействовать с минеральной частью.

Таким образом, молекулярное строение элементов реакционной массы обеспечивает их работу как поверхностно активные вещества. Исходя из принятой классификации, реакционную массу, получаемую при уничтожении фосфорорганической группы отравляющих веществ, можно отнести к ионоактивным анионактивной подгруппы.

Воздействие на физико-механические свойства материалов реакционной массы, а значит и битумно-солевой массы, является весьма существенным, а значит обоснованным для применения в дорожном строительстве при введении в составы асфальтобетона и битумных эмульсий.

Следующей задачей будет являться усовершенствование технологических схем, обеспечивающих возможность дозированного введения в составы дорожных материалов и укладки стандартным оборудованием.

В связи с этим увеличивается укрывистость битумных материалов, а, следовательно, и формирование более тонкой плёнки на поверхности минеральных материалов, что вызывает изменение механических свойств в дисперсной системе [4, 5]. Кроме того, повышение степени укрывистости, т.е. более полное покрытие поверхности минерального материала, позволяет при уплотнении получить наиболее рациональную упаковку щебня и песка. Это связано с уменьшением коэффициента трения между минеральными частицами.

Когезионные характеристики битума являются наиболее стабильными и сохраняются, как в толще массива битума, так и в толстых слоях. В тонких слоях сказывается влияние минерального материала, на котором находится битум. Пленочное состояние битума формирует высокие эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Формированию тонких слоёв способствуют в значительной мере ПАВы [6–8].

Кроме того, для определения влияния компонентов асфальтобетона на адгезионные параметры использовали теорию планирования эксперимента. Составы экспериментальных образцов формировались по трём факторам, где X_1 – битум, X_2 – песок, X_3 – минеральная порошок, по схеме «состав–свойство» с построением поверхности отклика частной выборки генеральной совокупности (рис. 1, 2). Обработка экспериментальных результатов производилась при помощи ППП «STATGRAPEACS».

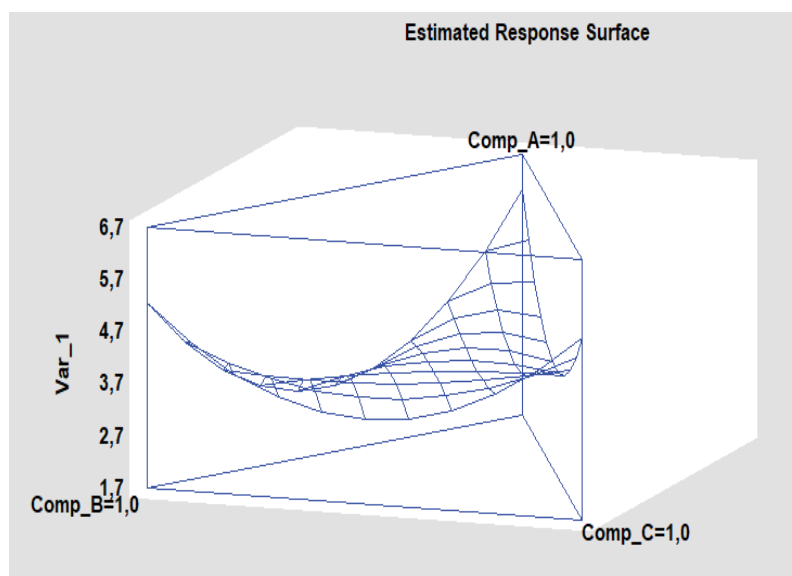


Рис. 1. Изометрическая поверхность отклика на поперечный сдвиг

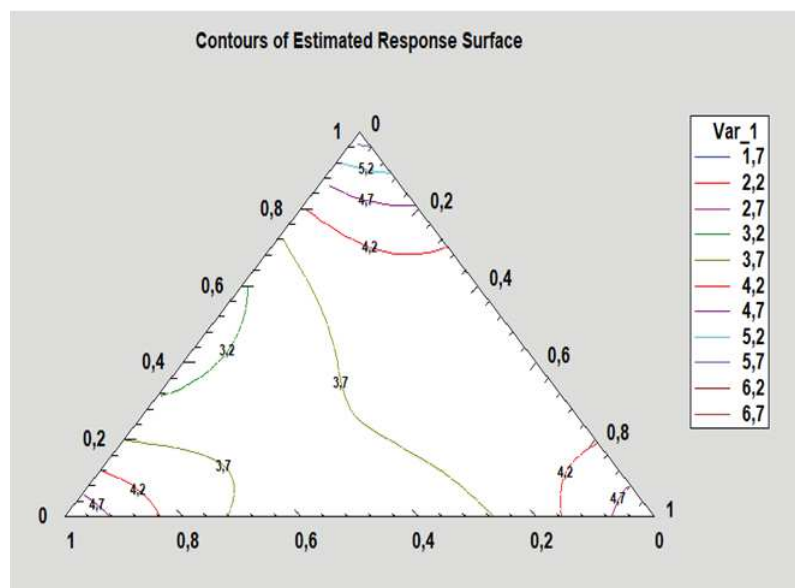


Рис. 2. Контур предполагаемой поверхности отклика на поперечный сдвиг

Результаты исследований. В результате статистической обработки получены соответствующие коэффициенты уравнения регрессии. При выборе соответствующей структуры уравнение получило следующий вид:

$$Y = 6,01099X_1 + 5,2399X_2 + 5,20634X_3 - 10,6773X_1X_2 - 7,5095X_1X_3 - 7,64845X_2X_3 + 30,1478X_1X_2X_3.$$

Для проверки адекватности описания уравнения исследуемым зависимостям использовали коэффициенты Фишера и Кохрена, значения которых не превышали табличных ограничений [9–13].

Исходя из значений коэффициентов регрессионного уравнения, которые прямо пропорционально влияют на отклик как одиночных, так и на комбинации факторов видно, что при комбинациях X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 значение отклика минимизируется, т.е. адгезионные взаимодействия уменьшаются. Кроме того, можно отметить, что эти компоненты обеспечивают максимальную суммарную поверхность минеральной части и битума, что в результате позволяет сформировать значительно большее количество битума в пленочной фазе.

Заключение. На основании вышеизложенного можно заключить, что на адгезионные взаимодействия в системе «лёд – асфальтобетон» физико-химического характера влияет пленочная фаза битума. На механический характер адгезии влияют другие факторы рассматриваемой системы. Следовательно, регулируя соотношения компонентов в системе «лёд–асфальтобетон», можно регулировать значение адгезионных взаимодействий, а это в свою очередь повлияет на безопасность автотранспортной системы. Кроме того, целесообразно использовать отходы техногенного происхождения с активными гидрофобными свойствами [14, 15].



1. Электронный ресурс URL: <http://www.seanews.ru>.
2. Электронный ресурс URL: <http://www.rosinfostat.ru>.
3. Электронный ресурс URL: <http://www.rosstat.gov.ru>.
4. Горельшев Н.В., Акимова Т.Н., Пименова И.И. Механические свойства битумов в тонких слоях // Опыт строительства асфальтобетонных покрытий. М., 1958. Вып. 23. С. 42–54.
5. Короткевич Н.Н. Физико-химические основы применения минеральных порошкообразных материалов (заполнителей) для дорожных асфальтовых бетонов и методы их испытаний. В кн.: Минеральные порошки для асфальтового бетона. М., 1940. С. 3–68.
6. Колбановская А.С., Шимулис С.П. Влияние природы битума и каменного материала на их сцепление // Исследование битумов и битумо-минеральных смесей. М., 1967. Вып. 2. С. 47.
7. Колбановская А.С., Михайлов В.В., Гезенцев Л.Б. Роль тонких слоёв битума в процессах структурообразования дисперсных битумо-минеральных материалов // Коллоидный журнал. 1963. Т. XXV. № 3. С. 321.
8. Колбановская А.С. Оптимальная структура битума в асфальтовом бетоне // Материалы симпозиума по структуре и структурообразованию в асфальтобетоне. Балашиха, 1968. 76 с.
9. Зедгенидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М., 1976. 390 с.
10. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента. М., 1975. 225 с.
11. Статистические методы планирования экспериментов в технологии строительных материалов // Сборник трудов. Челябинск. 1970. 159 с.
12. Хартман К., Лецкий Э. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М., 1977. 155 с.
13. Бродский В. З., Бродский Л. И., Голикова Т. И., Никитина Е. П., Панченко Л. А. Таблицы планов экспериментов для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание). М., 1982. 752 с.
14. Грехов П. И., Шкрабак В. С. Модификация свойств дорожных битумных эмульсий техногенными отходами // Известия Санкт-Петербургского государственного агроуниверситета. 2015. № 40. С. 269–274.
15. Грехов П.И., Шкрабак В.С. Асфальтобетонная смесь. Патент на изобретение № 2579128. Заявка № 2014111597. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 02 марта 2016.

REFERENCES

1. Electronic resource URL: <http://www.seanews.ru>.
2. Electronic resource URL: <http://www.rosinfostat.ru>.
3. Electronic resource URL: <http://www.rosstat.gov.ru>.
4. Gorelyshev N.V., Akimova T.N., Pimenova I.I. Mechanical properties of bitumen in thin layers. *Experience in the construction of asphalt concrete pavements*. Moscow, 1958; 23: 42–54. (In Russ.).
5. Korotkevich N.N. Physico-chemical bases of application of mineral powdered materials (aggregates) for asphalt road concrete and methods of their testing. *Mineral powders for asphalt concrete*. Moscow, 1940: 3–68. (In Russ.).
6. Kolbanovskaya A.S., Shimulis S.P. The influence of the nature of bitumen and stone material on their adhesion. *Research of bitumen and bitumen-mineral mixtures*. Moscow, 1967; 2:47. (In Russ.).
7. Kolbanovskaya A.S., Mikhailov V.V., Gezentsvey L.B. The role of thin layers of bitumen in the processes of structure formation of dispersed bitumen-mineral materials. *Colloidal Journal*. 1963; XXV; 3: 321. (In Russ.).
8. Kolbanovskaya A.S. Optimal structure of bitumen in asphalt concrete. In: Proceedings of the symposium on structure and structure formation in asphalt concrete. Balashikha. 1968. 76 p. (In Russ.).
9. Zedgenidze I. G. Experiment planning for the study of multicomponent systems. Moscow, 1976. 390 p. (In Russ.).
10. Brodsky V. Z. Introduction to factor planning of the experiment. Moscow, 1975. 225 p. (In Russ.).
11. Statistical methods of planning experiments in building materials technology. *Collection of works*. Chelyabinsk, 1970. 159 p. (In Russ.).
12. Hartman K., Letsky E. Planning an experiment in the study of technological processes. Moscow, 1977. 155 p. (In Russ.).
13. Brodsky V. Z., Brodsky L. I., Golikova T. I., Nikitina E. P., Panchenko L. A. Tables of experimental plans for factorial and polynomial models (reference edition). Moscow, 1982. 752 p. (In Russ.).
14. Grekhov P. I., Shkrabak V. S. Modification of properties of road bitumen emulsions by technogenic waste. *Proceedings of the St. Petersburg State Agricultural University*. 2015; 40: 269–274. (In Russ.).
15. Grekhov P.I., Shkrabak V.S. Asphalt concrete mixture. Patent for invention No. 2579128. Application no. 2014111597. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on March 02, 2016. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 6.10.2022; одобрена после рецензирования 28.10.2022; принята к публикации 12.11.2022.

The article was submitted 6.10.2022; approved after reviewing 28.11.2022; accepted for publication 12.11.2022.

