

EDN: **RDUYIX**

УДК 691.168

**В. И. БРАТЧУН, О. Б. КОНЕВ, В. В. ЖЕВАНОВ, Е. Д. РАЗМЫСЛОВА, Е. А. ШЕКУНОВА,  
Д. В. КОРШУН**ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевка, г. Макеевка

## **О ПАРАМЕТРАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОИЗВОДСТВА, УКЛАДКИ И УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

**Аннотация.** Показано, что одним из обязательных условий формирования оптимальной структуры композиционных материалов, приготовленных на органических вяжущих, являются оптимальные значения параметров режимов производства, укладки и уплотнения в конструктивных слоях дорожных одежд асфальтобетонных смесей. Предложен критерий оптимальной температуры объединения составляющих асфальтобетонной смеси в асфальтосмесителе, характеризуемый коэффициентом вариации однородности и содержания ключевого компонента асфальтобетонной смеси, в качестве которого принято содержание фракции песка  $d = 2,5...1,25$  мм, а также энергоёмкость производства асфальтобетонной смеси. На примере определения оптимальных температур укладки и уплотнения комплексно-модифицированной асфальтополимербетонной смеси, в которой нефтяной битум БНД 60/90 модифицирован этиленглицидилакрилатом (2,0 % мас.) в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105 (0,2 % мас.), установлено, что диапазон температур уплотнения 70...140 °С является оптимальным.

**Ключевые слова:** коэффициент вариации ключевого компонента дорожной асфальтобетонной смеси, оптимальные значения температур производства, укладки и уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Формирование структуры в дорожном асфальтобетоне начинается с момента объединения минеральных материалов с органическим вяжущим и заканчивается при уплотнении уплотняющими средствами и далее под движением автомобильного транспорта [1, 2].

Поэтому необходимо работать при оптимальных режимах производства асфальтобетонных смесей, их укладки и уплотнения, которые должны обеспечить высокоэнергетическое взаимодействие составляющих асфальтобетонов и более полное протекание физико-химических процессов на поверхности раздела фаз, например, модифицированное органическое вяжущее – минеральные материалы (минеральный порошок, песок, щебень).

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

Одной из операций при формировании структуры асфальтобетона является перемешивание от дозированных материалов, так как свойства асфальтобетона определяются энергией связей, возникающими между отдельными полидисперсными частичками минеральных материалов, которые в свою очередь зависят от процессов взаимодействия минеральных материалов и модифицированного нефтяного дорожного битума на их общей поверхности раздела фаз. Равномерность и полнота покрытия минеральных материалов адсорбционно-сольватными слоями органического вяжущего является функцией хорошего смачивания и определяется, прежде всего, молекулярно-поверхностными свойствами вяжущего. Известно [3, 4], что наиболее эффективно процессы смачивания и адсорбционного взаимодействия органических вяжущих и минеральных материалов происходят при

© В. И. Братчун, О. Б. Конев, В. В. Жеванов, Е. Д. Размысллова, Е. А. Шекунова, Д. В. Коршун, 2024



температурах, которым соответствует вязкость органических вяжущих  $\eta \leq 0,5$  Па·с. Если же органические вяжущие имеют вязкость  $\eta > 0,5$  Па·с, то смачивание будет происходить весьма замедленно и полного покрытия поверхности частиц минеральных материалов не произойдет. Это приводит в процессе эксплуатации к снижению коррозионной стойкости асфальтобетонного покрытия.

**Целью работы** является экспериментальное определение параметров режимов производства, укладки и уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей, отличающихся составом.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В настоящей работе в качестве критерия оптимальной температуры объединения минеральных материалов и нефтяного дорожного битума принят коэффициент однородности асфальтобетонной смеси, характеризуемый коэффициентом вариации содержания ключевого компонента смеси, в качестве которого принята фракция песка  $d = 2,5...1,25$ , а также энергоемкость процесса производства асфальтобетонных смесей.

С этой целью приготавливали асфальтополимербетонные смеси массой 5 кг в лабораторной мешалке в течение 5 минут при температурах 145, 155, 165 °С. Из разных мест замеса отбирали шесть проб (300 граммов каждая) и определяли состав смесей с помощью выжигания органического вяжущего и отмыывания вяжущего растворителем – петролейным эфиром. Отбирали фракцию 2,5...1,25 мм, взвешивали ее и определяли коэффициент вариации содержания фракции 1,25...2,5 мм.

$$K_v = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (1)$$

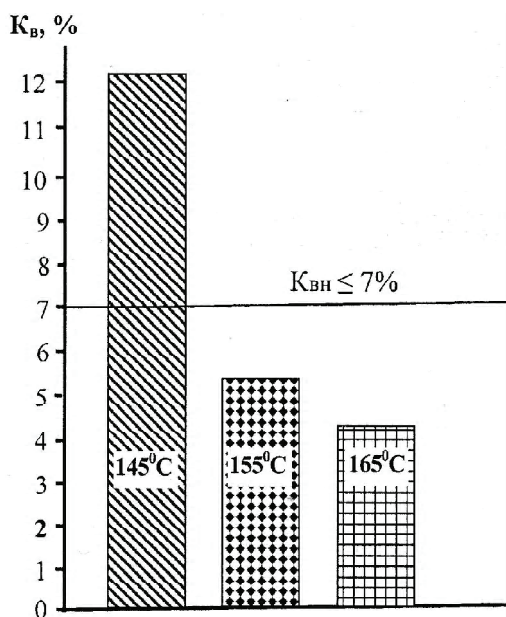
где  $S$  – среднее квадратичное отклонение содержания массы фракции 1,25...2,50 мм от среднего значения ( $\bar{X}$ ).

При температуре производства асфальтобетонной смеси 145 °С, получены значения масс содержания фракции 2,5...1,25 мм на сите 1,25 мм (г): 35,6; 33,4; 38,2; 37,8; 36,6; 34,1, тогда

$$\bar{X} = 36 \text{ (г)}; S = 4,44; K_v = 12,3 \text{ \%}.$$

При температуре производства асфальтобетонной смеси 155 °С получены значения масс содержания фракции 2,5...1,25 мм на сите 1,25 мм (г): 34,7; 38,3; 36,2; 37,4; 38,0; 35,7, тогда

$$\bar{X} = 36,7 \text{ (г)}; S = 1,998; K_v = 5,5 \text{ \%}.$$



**Рисунок 1** – Зависимость коэффициента вариации  $K_v$  содержания массы фракции  $d = 2,5...1,25$  мм от температуры производства.

При температуре производства асфальтобетонной смеси 165 °С получены следующие значения масс содержания фракции 2,5...1,25 мм на сите 1,25 мм (г): 38,4; 35,6; 34,4; 37,8; 36,2; 38,2, тогда

$$\bar{X} = 36,8; S = 1,61; K_v = 5,5 \text{ \%}.$$

Таким образом, при температурах производства асфальтобетонных смесей 155 и 165 °С достигается одинаковая однородность. В то же время коэффициент вариации содержания ключевого компонента в смеси, приготовленной при 145 °С составляет 12,3 %, что значительно выше нормативного значения  $K_v < 7 \text{ \%}$  (рис. 1). Энергоемкость производства модифицированных этиленглицидилакрилатом асфальтобетонных смесей, определенная для замеса массой 1 000 кг при начальной температуре  $T_n = 20$  °С, при температуре 165 °С значительно выше, чем при 155 °С.

$$Q = m_{\text{м.м.}} \cdot c_{\text{м.м.}} (T_1 - T_0) + m_{\text{б.п.}} \cdot c_{\text{б.п.}} (T_1 - T_0), \quad (2)$$

где  $m_{\text{м.м.}}$  – масса минерального материала – 1 000 кг;  
 $m_{\text{б.п.}}$  – масса битумополимерного вяжущего – 61 кг;  
 $c_{\text{м.м.}}$  и  $c_{\text{б.п.}}$  – удельная теплоемкость минеральных материалов и битумополимерного вяжущего соответственно.

$$c_{\text{м.м.}} = 0,75 \text{ кДж/кг}\cdot\text{с}, c_{\text{б.п.}} = 0,75 \text{ кДж/кг}\cdot\text{с}.$$

При температуре производства 155 °С

$$Q_1 = 1000 \cdot 0,75(155 - 20) + 61 \cdot 1,9(155 - 20) = 101250 + 15646,5 = 116896,5 \text{ кДж}.$$

При температуре производства 165 °С

$$Q_2 = 1000 \cdot 0,75 \cdot (165 - 20) + 61 \cdot 1,9(165 - 20) = 108750 + 16805,5 = 125555,5 \text{ кДж}.$$

Разница в энергии производства составляет

$$Q = 125555,5 - 116896,5 = 8659 \text{ кДж}.$$

Завершающей стадией структурообразования бетонных смесей на органических вяжущих на этапе технологической переработки является укладка и уплотнение ее в конструктивных слоях дорожной одежды. Уплотнение асфальтобетонных смесей при строительстве и ремонте нежестких дорожных одежд является очень важной технологической операцией с точки зрения обеспечения прочности, сдвигустойчивости и усталостной долговечности асфальтобетонных автомобильных дорог. Даже незначительное недоуплотнение приводит к значительному снижению прочности и долговечности асфальтобетонного покрытия (табл. 1, рис. 2) [5, 6].

Таблица 1 – Недоуплотнение асфальтобетонного покрытия

Коэффициент уплотнения	0,95	0,97	0,98	0,99	1,0	1,01
Изменение предела прочности при сжатии, %	55...60	75	88	100	110	122
Изменение долговечности, %	40...45	70	85	100	112	125

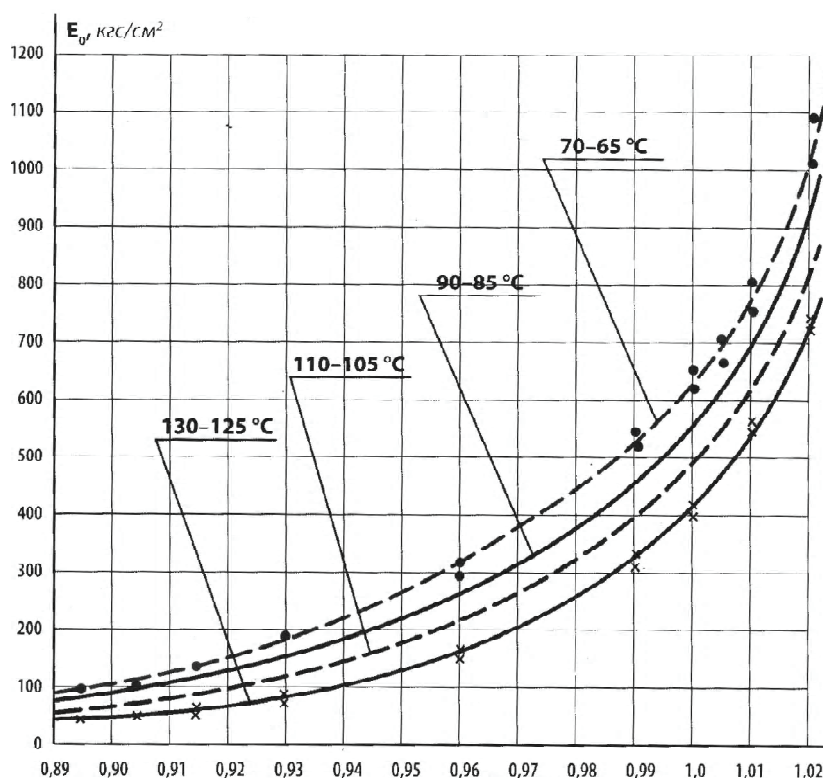


Рисунок 2 – Влияние коэффициента уплотнения  $K_{\text{упл}}$  и температуры  $T$  многощелевистой асфальтобетонной смеси на модуль деформации асфальтобетона  $E_0$ .

Приготовленная бетонная смесь на органических вяжущих представляет рыхлую массу. После укладки в слой покрытия (до уплотнения) смесь имеет среднюю плотность около 1800 кг/м<sup>3</sup>. Если допустить, что истинная плотность асфальтобетона – 2480 кг/м<sup>3</sup>, то можно рассчитать прирост плотности (уменьшение пористости) асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения.

$$V^{Ly} = \left(1 - \frac{1800}{2350}\right) \cdot 100 = 23,34 \% \quad (3)$$

$$V^{Ty} = \left(1 - \frac{2350}{2480}\right) \cdot 100 = 5,2 \% \quad (4)$$

Уплотнение уменьшает пористость асфальтобетона ( $V^{Ly} - V^{Ty}$  – разность пористостей до и после уплотнения) на 18,14 %.

Таким образом, уплотнение является чрезвычайно важной технологической операцией при формировании структуры и свойств асфальтобетона. Недоуплотнение является причиной образования колеи и наплывов летом, интенсивного разрушения (шелушение и выкрашивание) под действием воды и попеременного замораживания-оттаивания.

Для достижения запроектированной плотности бетонов на органических вяжущих необходимо расположить его минеральные зерна таким образом, чтобы расстояния между ними приближались к толщине слоя структурированного органического вяжущего. Это требует пространственного перемещения зерен, которого можно достичь в том случае, если уплотняющие катки создают в слое соответствующие нормальные и касательные напряжения [5].

Пространственному перемещению зерен один относительно другого препятствует зацепление зерен одно за другое, а также сопротивление пленок битума выдавливанию из зон контакта. Можно предположить, что уплотнение будет эффективным, когда

$$\sigma_{\text{упл}} > \sigma_3 + \sigma_6 \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{упл}}$  – уплотняющее напряжение;  
 $\sigma_3$  – сопротивление зерен перемещению в результате зацепления зерен одно за другое;  
 $\sigma_6$  – сопротивление пленок органического вяжущего выдавливанию.

Сопротивлению зерен перемещению в полной мере отвечает зависимость, подобная закону Кулона.

$$\sigma_3 = p \operatorname{tg} \varphi + c \quad (6)$$

где  $\varphi$  – угол трения в асфальтобетонной смеси;  
 $c$  – зацепление (когезия) структурированного битума;  
 $p$  – вертикальное давление.

Сопротивление слоев битума выдавливанию описывают формулой, подобной закону Ньютона:

$$\sigma_6 = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (7)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость выдавливания битума из зазора между минеральными зёрнами.

Тогда условие уплотнения бетонных смесей на органических вяжущих имеет вид:

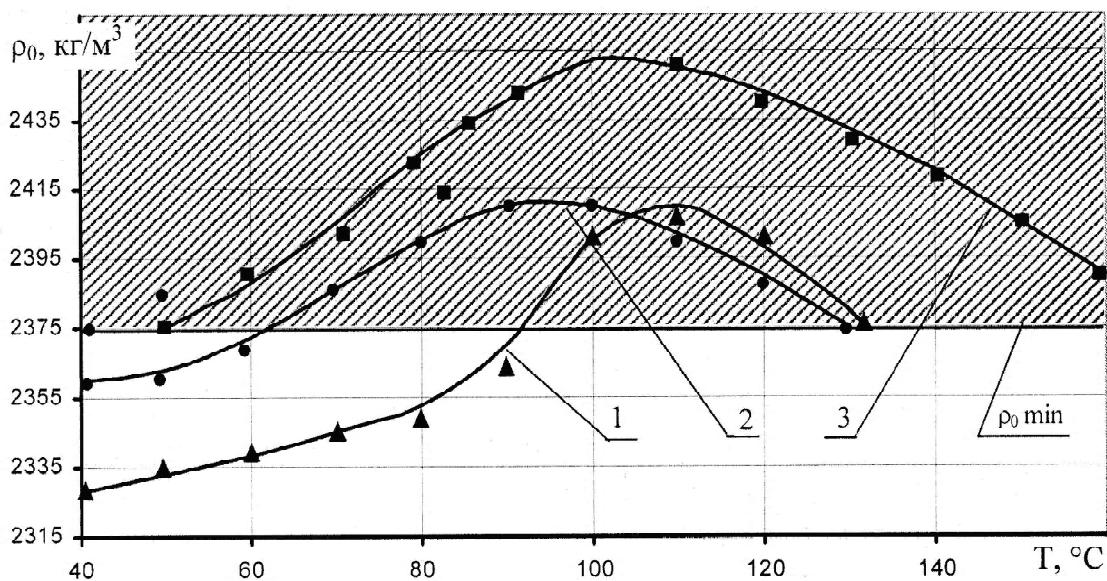
$$\sigma_{\text{упл}} > \eta \dot{\varepsilon} + p \operatorname{tg} \varphi + c \quad (8)$$

Это обусловлено снижением вязкости органических вяжущих, которые играют роль смазки. При приложении нагрузки происходит сближение минеральных частиц, что приводит к уменьшению занимаемого объема без деформации частиц. Диапазон температур уплотнения, который для комплексно-модифицированных бетонных смесей на модифицированном асфальтополимерсерном вяжущем веществе составляет 60...130 °С (индекс 2) и 50...150 °С  $\rho_0 = f(T)$  для асфальтобетонной смеси, модифицированной этиленглидицилакрилатом (индекс 3), 90...130 °С для традиционной горячей асфальтобетонной смеси (индекс 1) соответствует наиболее компактному размещению частиц минерального остова (рис. 3) [6, 7].

Причем последующее перемещение минеральных частиц практически отсутствует в связи с тем, что минеральные частицы в деформирующемся монолите переходят в состояние с более прочной связью через тонкие битумные пленки между ними.

Увеличение температуры смесей свыше 110...120 °С приводит к снижению когезионной прочности органических вяжущих стандартной асфальтобетонной смеси.

В этом случае минеральные частицы под действием уплотняющей нагрузки сближаются до предельно возможного расстояния, а после снятия нагрузки вследствие возникающих упругих деформаций



**Рисунок 3** – Зависимость средней плотности мелкозернистого асфальтобетона (тип Б) ( $\rho_0$ ) от температуры ( $T$ ): 1 – асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 40/60; 2 – асфальтополимерсеробетонная смесь, в которой битум БНД 40/60 модифицирован бутадиенмethylстирольным каучуком СКМС-30 (2 % масс.) и технической серой (30 % масс.), а минеральный порошок механоактивирован СКМС-30 (0,5 % масс.); 3 – асфальтобетонная смесь, в которой битум БНД 60/90 модифицирован этиленглицидилакрилатом (2,0 % масс.) в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105 (0,2 % масс.), минеральные материалы механоактивированы этиленглицидилакрилатом (0,7 % масс.).

частицы отталкиваются друг от друга (нисходящая ветвь кривой 1, рис. 3), система разуплотняется. На практике это приводит к образованию волосяных трещин после прохода катка.

Характерной особенностью поведения асфальтобетонной смеси при высоких температурах уплотнения является его температурная сегрегация [8]. Особенно это проявляется при транспортировании асфальтобетонных смесей от асфальтобетонного завода к месту укладки в слой дорожной одежды на расстояние более 20 км. Разница температур в верхних слоях смеси кузова автомобиля на 25... 35 °С ниже, чем в нижних слоях асфальтобетонной смеси. Процесс формирования температурной и структурной неоднородности асфальтобетонной смеси по температуре начинается, когда порция асфальтобетонной смеси выгружается из кузова автомобиля в бункер бетоноукладчика. При разнице температур в асфальтобетонной смеси более холодные участки смеси располагаются у стенок бункера асфальтоукладчика. Когда автомобиль разгружен и смесь в бункере асфальтоукладчика израсходована, фрагменты холодной асфальтобетонной смеси поступают на ленту конвейера асфальтоукладчика. Когда прибывает следующий автомобиль с асфальтобетонной смесью и разгружается в асфальтоукладчик, более охлажденная смесь передается обратно в шнековую камеру и разравнивается. Приглаживающая плита асфальтоукладчика не может уплотнить более холодную смесь и на свежеложенном покрытии (верхнем слое дорожной одежды) появляются явные участки с температурной сегрегацией (дефекты вследствие разницы температур уплотняемой асфальтобетонной смеси).

Видеосъемка с инфракрасной камерой, данные радиоактивного плотномера, а также компьютерная программа, с помощью которой можно строить профиль покрытия из уложенной и уплотняемой смеси выявили участки со значительной разницей в температурах. Более холодные участки не удастся уплотнить до нормативной плотности. Как выявлено в работе [7] наличие холодных областей в покрытии приводит к неравномерной плотности покрытия нежесткой дорожной одежды.

Следствием этого является формирование воздушных пузырей с сообщающимися между собой капиллярами, в которые проникает вода, что и приводит к снижению долговечности покрытия асфальтобетонной дороги вследствие более низкой водо- и морозостойкости.



## ВЫВОДЫ

Подготовленная для укладки асфальтобетонная смесь с комплексно-модифицированной структурой (индекс 3, рис. 3) должна иметь температуру 140...155 °С. Уплотнение асфальтобетонных смесей с комплексно-модифицированной этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой микро-, мезо- и макроструктурой следует вести в интервале температур 70...140 °С. Процесс уплотнения модифицированных этиленглицидилакрилатом асфальтобетонных смесей менее энергоемкий, чем традиционных асфальтобетонных смесей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцев, Н. В. Горельшев, А. М. Богуславский, И. В. Королев. – Москва : Транспорт, 1985. – 350 с. – Текст : непосредственный.
2. Дорожный теплый асфальтобетон / И. В. Королев, Е. Н. Агеева, В. А. Головкин, Г. Р. Фоменко. – Киев : Вища школа, 1981. – 200 с. – Текст : непосредственный.
3. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. – Харьков : Вища школа, 1977. – 116 с. – Текст : непосредственный.
4. Рыбьев, И. А. Асфальтовые бетоны : [учебное пособие для строительных и автомобильно-дорожных вузов] / И. А. Рыбьев. – Москва : Высшая школа, 1969. – 398 с. – Текст : непосредственный.
5. Костельов, М. П. Чем и как уплотнять асфальтобетон в покрытиях при смене его типа, состояния и толщины слоя / М. П. Костельов, Д. В. Пахаренко. – Текст : непосредственный // Каталог справочник «Дорожная техника». – 2007. – Санкт-Петербург : ИД «Славутич». – С. 70–85.
6. О закономерностях и параметрах технологических режимов уплотнения бетонных смесей с комплексно-модифицированной структурой / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер [и др.]. – Текст : непосредственный // Современные проблемы строительства : Ежегодный научный технический сборник № 14. – 2011. – 2011 (14). – С. 136–144.
7. О температурных режимах укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей с комплексно-модифицированной микроструктурой / В. И. Братчун, Е. Э. Самойлова, В. Л. Беспалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2007. – Випуск 2007-1(63) Сучасні будівельні матеріали. Композиційні матеріали для будівництва. – С. 24–28.
8. Радовский, Б. С. Сегрегация асфальтобетонных смесей и методы борьбы с ней в США / Б. С. Радовский. – Текст : непосредственный // Дорожная техника, технология: каталог-справочник. – 2017. – Санкт-Петербург : ИД «Славутич». – С. 25–40.

Получена 11.12.2023

Принята 26.01.2024

VALERY BRATCHUN, OLEG KONEV, VYACHESLAV ZHEVANOV,  
EKATERINA RAZMYSLOVA, ELENA SHEKUNOVA, DMITRY KORSHUN  
ON THE PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL MODES OF PRODUCTION, LAYING  
AND COMPACTION OF ROAD ASPHALT CONCRETE MIXTURES  
FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian  
Federation, Donetsk People's Republic, Makeevka

**Abstract.** It is shown that one of the obligatory conditions for the formation of the optimal structure of composite materials prepared on organic binders is the optimal values of the parameters of the modes of production, laying and compaction of asphalt-concrete mixtures in the structural layers of roadways. The criterion of optimal temperature of association of asphalt concrete mixture components in the asphalt mixer characterized by the coefficient of variation of homogeneity and content of the key component of the asphalt concrete mixture, as which is taken the content of sand fraction  $d = 2.5...1.25$  mm, as well as energy intensity of asphalt concrete mixture production is proposed. On the example of determination of optimum temperatures of laying and compaction of complex-modified asphalt-polymer concrete mixture, in which oil bitumen BND 60/90 is modified by ethylene glycidylacrylate (2.0 % wt.) in combination with polyphosphoric acid PFK-105 (0.2 % wt.), it is established that the range of compaction temperatures 70...140 °C is optimum.

**Keywords:** coefficient of variation of the key component of road asphalt concrete mixes, optimum values of production, paving and compaction temperatures of road asphalt concrete mixes.

**Братчун Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой автомобильных дорог и аэродромов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физико-химическая механика технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных

слоев нежестких дорожных одежд на основе модифицированных органических вяжущих и комплексного модифицирования структуры бетонов; разработка эффективных технологий переработки техногенного сырья в компоненты композиционных материалов.

**Конев Олег Борисович** – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны на основе кристаллических металлургических шлаков и жидкого стекла.

**Жеванов Вячеслав Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: получение технологичных и долговечных дорожных бетонов для строительства конструктивных слоев нежестких дорожных одежд.

**Размыслова Екатерина Дмитриевна** – студентка ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: модифицированные асфальтобетоны повышенной долговечности.

**Шекунова Елена Александровна** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: модифицированные асфальтобетоны повышенной долговечности.

**Коршун Дмитрий Владимирович** – магистрант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: модифицированные асфальтобетоны повышенной долговечности.

**Bratchun Valery** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Highways and Air Fields Department, FSBEI HE «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.

**Konev Oleg** – Ph. D. (Eng.), assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: concretes based on crystalline metallurgical slags and liquid glass.

**Zhevanov Vyacheslav** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Highways and Air Fields Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: getting-tech and durable road concretes for building structural layers of non-rigid pavements.

**Razmyslova Ekaterina** – student, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: modified asphalt concrete of increased durability.

**Shekunova Elena** – master's student, Highways and Air Fields Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: modified asphalt concrete of increased durability.

**Korshun Dmitry** – master's student, Highways and Air Fields Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: modified asphalt concretes of increased durability.