

журналу «Строительные материалы». – 2006. – № 9]. – С. 11–13.

60. **Королев, Е. В.** Модифицирование строительных материалов нанокремнеземными трубками и фуллеренами / Е. В. Королев, Ю. М. Баженов, В. А. Береговой // Строительные материалы. – 2006. – № 8 [приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы». – 2006. – № 9]. – С. 2–4.

61. **Лотов, В. А.** Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий / В. А. Лотов // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 10–12.

62. **Комохов, П. Г.** Наноструктурированный радиационный бетон и его универсальность / П. Г. Комохов, Н. И. Александров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 38–40.

63. **Чернышов, Е. М.** Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема: вопросы теории и приложений / Е. М. Чер-

нышов, Д. Н. Коротких // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 30–32.

64. **Ратинов, В. Б.** Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.

65. **Вавржин, Ф.** Химические добавки в строительстве / Ф. Вавржин, Р. Крмча. – М.: Стройиздат, 1964. – 288 с.

66. **Ма, J.** Ultra High Performance Self Compacting Concrete / J. Ma, J. Dietz // LACER. – 2002. – № 7.

67. **Уникальные бетоны и технологии в практике современного строительства России / С. С. Каприелов [и др.] // Проблемы соврем. бет. и ж/бетона: сб. тр. – Минск: Стринко, 2007. – С. 105–120.**

68. **Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона: СТБ 1168–99. Бетоны.**

Поступила 03.03.2009

УДК 625.855.3

КАК ПОЛУЧИТЬ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ СМЕСИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКТИВНЫХ ОДЕЖД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И УЛИЦ

Докт. техн. наук, проф. ВЕРЕНЬКО В. А., канд. техн. наук ЗАНКОВИЧ В. В.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время все чаще задаются вопросом, как получить асфальтобетоны, соответствующие по своим показателям реальным транспортным нагрузкам и погодноклиматическим факторам. При поиске ответа на этот вопрос заказчики строительства, проектировщики и производители асфальтобетонных смесей понимают, что без применения новых эффективных компонентов, определяющих состав асфальтобетонных смесей, решить эту проблему не представляется возможным.

На сегодняшний день для улучшения качества асфальтобетонных смесей во всем мире принято считать использование в их составе следующих компонентов:

- модифицированных битумов;
- кубовидного щебня;
- модифицирующих добавок;
- стабилизирующих добавок;

- структурирующих добавок;
- адгезионных добавок;
- активированных минеральных материалов и вяжущих.

Безусловно, все эти способы по-разному влияют на получение конечного продукта с заданными свойствами, а именно асфальтобетонной смеси. При этом стоимость асфальтобетонных смесей, полученных разными способами, будет также отличаться.

Какой же выбрать способ модификации асфальтобетонной смеси? И какой способ наиболее эффективен с точки зрения обеспечения требуемых физико-механических характеристик асфальтобетона и экономических показателей?

Используя существующие технические нормативные правовые акты для оценки качества асфальтобетонных смесей, получить ответ на

данные вопросы не представляется возможным, так как в них отсутствует основной показатель эффективности – это долговечность асфальтобетона, которая и определяет срок его службы без появления определенного количества дефектов, снижающих технико-эксплуатационное состояние покрытия.

Установление показателя долговечности асфальтобетона. В общем случае, методы, применяемые для оценки долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий, можно подразделить на три группы:

1) методы, основанные на визуально-инструментальных обследованиях состояния дорожного покрытия, условий движения и эксплуатации с последующей обработкой результатов и прогнозом сроков службы (например, система НДМ, система диагностики дорожных покрытий в Республике Беларусь, России и других странах);

2) методы, основанные на применении классических теорий долговечности композиционных материалов с привязкой к особенностям поведения дорожных покрытий (например, потоковая теория Эйринга [1], теория Тобольского – Эйринга [2], теория Журкова – Буше [3], теория Сяо – Кауша [4], теория Буше – Халпина [5] и др.);

3) методы, основанные на моделировании условий работы материала в лаборатории с последующим анализом протекающих в его структуре процессов (рентгеновские и др.).

Визуально-инструментальные методы можно применить только для материалов, прослуживших достаточно большие сроки и имеющих видимые дефекты. На основании данных методов нельзя прогнозировать ресурс новых материалов, поскольку отсутствует анализ процессов кинетики накопления повреждаемости и деструкции материала при эксплуатации. Однако опыт применения данных методов следует использовать при разработке методики прогнозов сроков службы материалов, находящихся в эксплуатации.

Классические теории долговечности применимы для материалов, работающих в условиях одного вида напряженного состояния. Для адаптации реальных материалов требуются очень длительные и высокоточные эксперименты. Практически невозможно привести к еди-

ному критерию процессы механического и физико-химического разрушения. Методы, основанные на исследовании процессов деструкции, имеют интерес с точки зрения оценки воздействия физико-химических факторов. Однако использовать их для оценки прогнозов появления деформаций и разрушений от механических нагрузок не представляется возможным.

Для разработки методики оценки качества и долговечности асфальтобетона предлагается использовать подходы, основанные на теории кинетики накопления повреждаемости и теории надежности. Теоретические подходы и основные решения по данной проблеме приведены в [6, 7].

Для уточнения методики и учета реальных особенностей эксплуатации дорожных покрытий в условиях Беларуси в 2000 г. был выполнен мониторинг вновь построенных асфальтобетонных покрытий на автомобильных дорогах М1/Е30 «Брест – Минск – гр. РФ», М5 «Минск – Гомель», М8 «гр. РФ – Витебск – Гомель – гр. Украины» и М3 «Минск – Витебск». Для этих целей были отобраны образцы асфальтобетона из 36 мест, которые испытывались по стандартной методике СТБ 1033–2004 и методике, основанной на определении коэффициентов запаса прочности и уровней надежности по четырем критериям деформационной устойчивости: сдвигоустойчивости, температурной трещиностойкости, усталостной трещиностойкости, коррозионной стойкости [8]. При этом в качестве кривой распределения (надежности) использовалась кривая Гаусса (нормальная).

Через четыре года эксплуатации было проведено визуальное обследование с определением площади дефектов на покрытиях указанных участков для корректировки методики определения уровней надежности и их сопоставления с реальным сроком службы.

Фактическая площадь разрушений оказалась ниже теоретической, полученной в результате мониторинга 2000 г. Это естественно, поскольку теоретические уровни надежности были определены на срок службы 10–12 лет. Однако полученные данные позволили скорректировать теоретические показатели с учетом времени, для этого в 2004 г. был проведен повтор-

ный отбор образцов асфальтобетона из покрытия и анализ.

В частности, установлено, что нормальная кривая распределения может быть применена для определения не всех частных уровней надежности (например, она не подходит для адекватного описания показателей усталостной трещиностойкости и коррозионной стойкости).

Наибольшее отклонение прогнозируемых уровней надежности от полученных при визуальном обследовании наблюдалось для критериев сдвигоустойчивости и температурной трещиностойкости (в 4 и 3 раза соответственно), меньшее для усталостной трещиностойкости (в 1,2 раза) и коррозионной стойкости (в 1,1 раза). Поэтому была выполнена корректировка зависимостей для определения коэффициентов запаса прочности по сдвигоустойчивости, температурной и усталостной трещиностойкости.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости уровней надежности от значений коэффициентов запаса, представленные на рис. 1.

Анализ зависимостей показывает, что в наибольшей степени уровень надежности «чувствителен» к коэффициенту запаса прочности по критерию коррозионной стойкости и в меньшей степени к коэффициенту запаса прочности по критерию сдвигоустойчивости. То есть увеличение показателей физико-механических свойств асфальтобетона, направленных на повышение коррозионной стойкости, наиболее заметно проявится с точки зрения повышения долговечности в эксплуатации.

С учетом введенных корректировок методика определения коэффициентов запаса прочности приняла окончательный вид. В соответствии с ней коэффициент запаса прочности по критерию сдвигоустойчивости определяют по выражению

$$K_1 = \frac{c}{\sigma_p - k\sigma_c \operatorname{tg}\varphi} n, \quad (1)$$

где c и φ – внутреннее сцепление и угол внутреннего трения; σ_p и σ_c – растягивающие и сжимающие напряжения на контакте колеса с покрытием, равные 0,65 и 1,0 МПа соответственно; n – параметр, учитывающий соотноше-

ние фактического и длительного модулей релаксации, равный 0,7; k – коэффициент, учитывающий несовпадение угла взаимодействия растягивающих и сжимающих напряжений, равный 0,43.

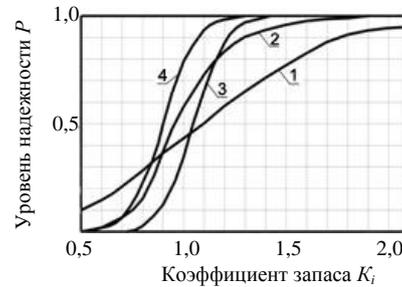


Рис. 1. Зависимость уровня надежности от величины коэффициента запаса по критериям: 1 – сдвигоустойчивости; 2 – температурной трещиностойкости; 3 – усталостной трещиностойкости; 4 – коррозионной стойкости

Коэффициент запаса по критерию температурной трещиностойкости определяют расчетом по следующей формуле:

$$K_2 = \frac{0,5R_c}{R_0}, \quad (2)$$

где R_c – максимальная прочность материала, реализуемая в широком диапазоне температур и времени нагружения, МПа; R_0 – предел прочности при растяжении при температуре 0 °С, МПа.

Значение R_c определяют

$$R_c = \frac{\bar{R}}{1 + 1,921 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right)}, \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – пределы прочности при растяжении при температуре –15 °С при скорости деформации 3 и 10 мм/мин соответственно;

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2}{2}. \quad (4)$$

Коэффициент запаса по критерию усталостной долговечности вычисляют как

$$K_3 = \frac{R_c}{R_c^{\text{тп}}}, \quad (5)$$

где $R_c^{\text{тп}}$ – требуемое значение максимальной прочности, зависящее от категории дороги;

- категории I, II – 5,5 МПа;
- категория III – 5,0 МПа;
- категория IV – 4,0 МПа.

Коэффициент запаса по коррозионной стойкости определяют по формуле

$$K_4 = \frac{K_{\phi}}{K_{\text{тр}}}, \quad (6)$$

где K_{ϕ} и $K_{\text{тр}}$ – фактический и требуемый коэффициенты морозостойкости в агрессивной среде. Для условий Беларуси $K_{\text{тр}}$ составляет 0,8 для асфальтобетона верхнего слоя и 0,5 – для асфальтобетона нижних слоев.

По полученным коэффициентам запаса прочности определяют частные уровни надежности (P_1, P_2, P_3, P_4) по зависимостям на рис. 1. Общий уровень надежности можно рассчитать

$$P_{\text{общ}} = \sqrt[4]{P_1 P_2 P_3 P_4}. \quad (7)$$

Зависимость, связывающая общий уровень надежности и расчетный срок службы асфальтобетона в дорожном покрытии до капитального ремонта, разработана в результате выполнения научно-исследовательской работы «Участие в исследованиях методов диагностики дорожно-строительных материалов при ремонте и содержании автомобильных дорог и в исследованиях влияния сроков службы дорожно-строительных материалов в реальных условиях на их физико-химические свойства» (в период 2004–2005 гг., заказчик РУП «Белдорцентр») и проведения диагностики материалов дорожных покрытий улиц г. Минска в период 2004–2007 гг. (рис. 2).

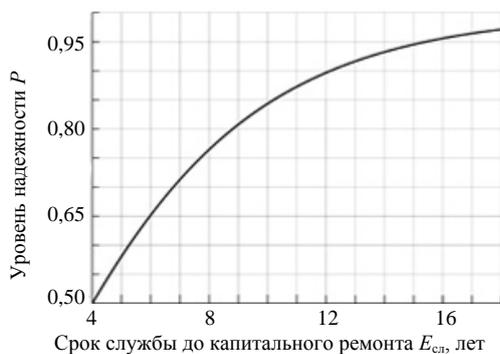


Рис. 2. Зависимость расчетного срока службы асфальтобетона в покрытии до капитального ремонта от общего уровня надежности

В качестве критерия, определяющего предельное состояние асфальтобетона в покрытии, был использован фактический уровень надежности по [9].

Методика расчета показателя технико-экономической эффективности асфальтобетонных смесей. Годовой экономический эффект \mathcal{E} от создания и использования дорожного покрытия из более высококачественной асфальтобетонной смеси (в том числе с модифицирующими добавками) определяется на основании определенных сроков службы покрытия по формуле [10]

$$\mathcal{E} = [(Z_1 + Z_{c1})\phi + \mathcal{E}_3 - (Z_2 + Z_{c2})]A_2, \quad (8)$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на приготовление материалов с учетом стоимости транспортировки до стройплощадки по сравниваемым вариантам, в руб. на единицу измерения; Z_{c1} и Z_{c2} – то же на устройство покрытия по сравниваемым вариантам, руб. на единицу измерения; ϕ – коэффициент изменения срока службы нового дорожного покрытия по сравнению с базовым вариантом, рассчитывается по формуле

$$\phi = \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}, \quad (9)$$

где P_1 и P_2 – доли сметной стоимости дорожных покрытий в расчете на 1 год их службы по сравниваемым вариантам, определяемые по табл. 1 в зависимости от сроков службы; E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,15; \mathcal{E}_3 – экономия в сфере эксплуатации дорожных покрытий за весь срок их службы (может быть принят равным нулю, если предполагается, что дорожные покрытия проработают весь срок службы без появления деформаций); A_2 – годовой объем строительно-монтажных работ с применением новых дорожных покрытий в расчетном году, в натуральных единицах.

Таблица 1

$T_{\text{сл}}$	P	$P + E_n$	$T_{\text{сл}}$	P	$P + E_n$
-----------------	-----	-----------	-----------------	-----	-----------

1	1,0000	1,1500	10	0,0627	0,2127
2	0,4762	0,6262	11	0,0540	0,2040
3	0,3021	0,4521	12	0,0468	0,1968
4	0,2155	0,3655	13	0,0408	0,1908
5	0,1638	0,3138	14	0,0357	0,1857
6	0,1296	0,2796	15	0,0315	0,1815
7	0,1054	0,2554	20	0,0175	0,1675
8	0,0874	0,2374	25	0,0102	0,1602
9	0,0736	0,2236	30	0,0061	0,1561

Исходя из (8) с учетом приведенных выше данных ((7), рис. 2) может быть получена зависимость для определения доли сметной стоимости дорожного покрытия в расчете на 1 год его службы с учетом нормативного коэффициента сравнительной экономической эффективности капитальных вложений ($P_1 + E_n$):

$$P_{ен} = f(P), \tag{10}$$

где P – общий уровень надежности асфальтобетона дорожного покрытия, определенный по (7).

Для упрощения проведения испытаний и расчетов общий уровень надежности может быть выражен через показатели физико-механических свойств асфальтобетона:

- 1) внутреннее сцепление при температуре 50 °C (C_{50}), МПа;
- 2) угол внутреннего трения при температуре 50 °C (φ_{50}), град.;
- 3) предел прочности при растяжении при температуре 0 °C (R_0), МПа;
- 4) предельная структурная прочность (R_c), МПа;
- 5) водонасыщение (W), %.

Величина общего уровня надежности может быть выражена через коэффициент увеличения показателей физико-механических свойств:

$$I_{общ} = \sqrt[5]{I_1 I_2 I_3 I_4 I_5}; \tag{11}$$

$$I_1 = \frac{\varphi_{50}^\phi}{\varphi_{50}^{тр}}; \quad I_2 = \frac{C_{50}^\phi}{C_{50}^{тр}}; \quad I_3 = \frac{(R_c / R_0)_\phi}{(R_c / R_0)_{тр}};$$

$$I_4 = \frac{R_c^\phi}{R_c^{тр}}; \quad I_5 = \frac{W_{тр}}{W_\phi}, \tag{12}$$

где φ_{50}^ϕ , C_{50}^ϕ , $(R_c / R_0)_\phi$, $R_c^{тр}$, $W_{тр}$ – показатели физико-механических свойств асфальтобетона, определяемые по результатам проведения испытаний; $\varphi_{50}^{тр}$, $C_{50}^{тр}$, $(R_c / R_0)_{тр}$, R_c^ϕ , W_ϕ – то же исходя из требуемого срока службы покрытия без появления дефектов, равного 10 лет.

Тогда эмпирическая формула для определения доли сметной стоимости дорожного покрытия в расчете на 1 год его службы $P_{ен}$ с учетом нормативного коэффициента сравнительной экономической эффективности капитальных вложений, равного 0,15:

$$P_{ен} = 0,22 I_{общ}^{-0,75}. \tag{13}$$

Далее определяется показатель эффективности от изменения срока службы асфальтобетона в дорожной конструкции β , который показывает, во сколько раз модифицированная асфальтобетонная смесь (с модифицирующими добавками или модифицированным битумом, на рядовом или кубовидном щебне и т. д.) может быть дороже асфальтобетонной смеси без добавок (базовой смеси) (на рядовом щебне и вязком дорожном битуме):

$$\beta = \frac{P_{ен}^0}{P_{ен}^1}, \tag{14}$$

где $P_{ен}^0$ – доля сметной стоимости базового асфальтобетона; $P_{ен}^1$ – то же модифицированного асфальтобетона.

Стоимость модифицированной асфальтобетонной смеси не может быть выше более чем в β раз, с точки зрения обеспечения технико-экономической эффективности, в сравнении со стоимостью базовой асфальтобетонной смеси. То есть должно выполняться условие

$$\frac{C_1}{C_0} \leq \beta, \tag{15}$$

где C_1 – стоимость 1 т модифицированной асфальтобетонной смеси; C_0 – то же базовой асфальтобетонной смеси.

При сравнении нескольких составов асфальтобетонных смесей с различной вариацией компонентов (например, добавок, кубовидного щебня и модифицированного битума различных производителей), определяющих повышение прочностных свойств, для производства выбирается состав, для которого показатель β имеет наибольшее значение выше 1,00 при выполнении условия по формуле (14).

Пример выбора экономически эффективной асфальтобетонной смеси. Для проектирования состава щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси для устройства верхнего слоя покрытия имеются следующие исходные материалы:

- 1) модифицирующая добавка в смесь импортного производства;
- 2) модифицирующая добавка в смесь отечественного производства;
- 3) рядовой щебень по ГОСТ 8267;
- 4) кубовидный щебень по СТБ 1311;
- 5) битум вязкий дорожный БНД 60/90 по ГОСТ 22245;
- 6) модифицированный битум БМА 70/100 по СТБ 1220.

В результате оптимального проектирования асфальтобетонных смесей в соответствии с требованиями технических нормативных правовых актов и с учетом требуемых характеристик по разделу 2 разработаны следующие составы:

1-й состав: асфальтобетонная смесь на рядовом щебне и битуме дорожном вязком со стабилизирующей добавкой (базовая смесь);

2-й состав: асфальтобетонная смесь на рядовом щебне и битуме дорожном вязком с использованием модифицирующей добавки импортного производства;

3-й состав: асфальтобетонная смесь на рядовом щебне и битуме дорожном вязком с использованием модифицирующей добавки отечественного производства;

4-й состав: асфальтобетонная смесь на рядовом щебне и модифицированном битуме;

5-й состав: асфальтобетонная смесь на кубовидном щебне и модифицированном битуме.

Стоимость 1 т асфальтобетонной смеси указанных составов:

состав № 1 – 96350 руб.; состав № 2 – 122110 руб.; состав № 3 – 110340 руб.; состав № 4 – 124320 руб.; состав № 5 – 134420 руб.

Определим показатель эффективности (табл. 2 и 3). Таким образом, в соответствии с формулой (14) составы № 2, 4, 5 не являются эффективными с точки зрения повышения стоимости асфальтобетонных смесей в сравнении с увеличением их физико-механических показателей:

состав № 2: $122110/96350 = 1,267 > 1,148$ – условие (14) не выполнено;

состав № 3: $110340/96350 = 1,145 < 1,171$ – условие (14) выполнено;

состав № 4: $124320/96350 = 1,290 > 1,116$ – условие (14) не выполнено;

состав № 5: $134420/96350 = 1,395 > 1,171$ – условие (14) не выполнено.

Состав № 3 соответствует условиям эффективности по (14), (15), а модифицирующая добавка отечественного производства принимается для окончательного проектирования производственного состава асфальтобетонной смеси.

ВЫВОДЫ

Представленная методика выбора компонентов для приготовления асфальтобетонных смесей, основанная на обеспечении технико-экономической эффективности, направлена на эффективное использование денежных средств. Во-первых, за счет оптимального соотношения между ценой и качеством асфальтобетонной смеси, определяемого сроком ее службы в покрытии, во-вторых, за счет исключения ошибок при выборе из всей гаммы используемых в настоящее время в мировой практике компонентов асфальтобетонных смесей.

Таблица 2

Характеристики физико-механических свойств асфальтобетонных смесей

Показатель свойств	Состав				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Внутреннее сцепление при температуре 50 °С C_{50} , МПа	0,32	0,58	0,55	0,46	0,59
Угол внутреннего трения при температуре 50 °С φ_{50} , град.	39,77	41,00	41,41	39,96	42,23

Предел прочности при растяжении при температуре 0 °С R_0 , МПа	2,66	2,95	2,86	3,02	3,18
Предельная структурная прочность R_c , МПа	5,82	7,05	7,26	7,14	7,22
Водонасыщение W , %	1,78	1,77	1,84	1,78	1,70

Таблица 3

Определение показателя эффективности

Показатель свойств	Состав				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
I_1	0,32/0,55 = 0,58	0,58/0,55 = 1,05	0,60/0,55 = 1,09	0,46/0,55 = 0,84	0,62/0,55 = 1,13
I_2	39,77/41 = 0,97	41/41 = 1,00	41,41/41 = 1,01	39,96/41 = 1,00	42,23/41 = 1,03
I_3	$(5,82/2,66) / (7,0/3,5) = 1,09$	$(7,05/2,95) / (7,0/3,5) = 1,19$	$(7,26/2,86) / (7,0/3,5) = 1,27$	$(7,14/3,02) / (7,0/3,5) = 1,18$	$(7,22/3,18) / (7,0/3,5) = 1,14$
I_4	5,82/7,00 = 0,83	7,05/7,00 = 1,01	7,26/7,00 = 1,04	7,14/7,00 = 1,02	7,22/7,00 = 1,03
I_5	2,00/1,78 = 1,12	2,00/1,77 = 1,13	2,00/1,80 = 1,11	2,00/1,78 = 1,12	2,00/1,70 = 1,18
$I_{общ}$	$(0,58 \cdot 0,97 \cdot 1,09 \times 0,83 \cdot 1,12)^{0,2} = 0,89$	$(1,05 \cdot 1,00 \cdot 1,19 \times 1,01 \cdot 1,13)^{0,2} = 1,07$	$(1,09 \cdot 1,01 \cdot 1,27 \times 1,04 \cdot 1,11)^{0,2} = 1,10$	$(0,84 \cdot 1,00 \cdot 1,18 \times 1,02 \cdot 1,12)^{0,2} = 1,03$	$(1,13 \cdot 1,03 \cdot 1,14 \times 1,03 \cdot 1,18)^{0,2} = 1,10$
$P_{ен}$	$0,22 \cdot 0,89^{-0,75} = 0,240$	$0,22 \cdot 1,07^{-0,75} = 0,209$	$0,22 \cdot 1,10^{-0,75} = 0,205$	$0,22 \cdot 1,03^{-0,75} = 0,215$	$0,22 \cdot 1,10^{-0,75} = 0,205$
β	0,240/0,240 = 1,00	0,240/0,209 = 1,148	0,240/0,205 = 1,171	0,240/0,215 = 1,116	0,240/0,205 = 1,171

Применение данной методики позволяет вести направленный поиск новых материалов для приготовления асфальтобетонных смесей и производить оценку их эффективности.

Использование показателя технико-экономической эффективности может обеспечить правильный выбор поставщиков материалов в процессе тендерных торгов за счет того, что заказчик будет иметь предварительные стоимости компонентов исходя из их эффективности, а, следовательно, можно сразу отсеивать материалы, которые по своим ценовым показателям не соответствуют требуемым показателям качества асфальтобетонных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Marshall, G. P.** Fracture phenomena in polystyrene / G. P. Marshall, L. E. Culver, J. G. Williams // Journal of Materials science. – 1969. – Vol. 37. – P. 75–81.
 2. **Griffith, R.** The fracture energy of some epoxy resin materials / R. Griffith, D. G. Holloway // Journal of Materials science. – 1970. – Vol. 5. – P. 302–307.

3. **Curtis, J. W.** The effect of pre-orientation on the fracture properties of glassy polymer / J. W. Curtis // Journal of Physics. – 1970. – Vol. 3. – P. 1413–1422.

4. **Döll, W. J.** A molecular weight dependent fracture transition in polymethylmethacrylate / W. J. Döll // Journal of Materials science. – 1975. – Vol. 10. – P. 935–942.

5. **Williams, J. G.** The effect of rate on the impact fracture toughness of polymers / J. G. Williams, M. W. Birch // Journal of Materials science. – 1977. – Vol. 1. – P. 501–528.

6. **Веренько, В. А.** Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / под ред. И. И. Леонovichа. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 246 с.

7. **Повышение** надежности автомобильных дорог / под ред. И. А. Золоторя. – М.: Транспорт, 1977. – 183 с.

8. **Веренько, В. А.** Надежность дорожных одежд: пособие / В. А. Веренько. – Минск: БГПА, 2002. – 120 с.

9. **Проектирование** дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов: ТКП 45-3.03-3-2004(02250). – Введен впервые. Издание официальное. – Минск: Министерство строительства и архитектуры Республики Беларусь, 2005. – 68 с.

10. **Инструкция** по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений: СН 509–78: утв. постановлением Госкомитета СССР по делам строительства от 13 декабря 1978 г. № 229. – М.: Госстрой СССР, 1978. – 52 с.

Поступила 09.09.2008

УДК 528.063

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НИВЕЛИРНЫХ СЕТЕЙ**