

Сергей Егорович**КРАВЧЕНКО,**кандидат технических наук,
директор республиканского
дочернего унитарного
предприятия"Белорусский дорожный
научно-исследовательский
институт "БелдорНИИ"**Вадим Викторович****ГРИШАНОВ,**инженер республиканского
дочернегоунитарного предприятия
"Проектный
институт "Гомельгипрозем"

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ НА КРИТЕРИЙ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В ЗОНЕ ЕЕ МАКСИМАЛЬНОЙ И МИНИМАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

EFFECTS OF ASPHALT-CONCRETE MIXTURE COMPONENTS ON THE CRITERION OF FATIGUE FAILURE IN THE AREAS OF ITS MAXIMUM- AND MINIMUM-LIFE CYCLES

В статье рассмотрены вопросы оптимизации состава асфальтобетона по критерию усталостной повреждаемости с использованием математического планирования эксперимента, влияние компонентов асфальтобетонной смеси на критерий усталостной повреждаемости в зоне ее максимальной и минимальной долговечности.

This article deals with the problems of asphalt concrete composition optimization by the criterion of fatigue failure using mathematical planning of the experiment. The effects of asphalt-concrete mixture components on the criterion of fatigue failure in the areas of its maximum- and minimum-life cycles have been considered.

ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетон представляет собой сложный композиционный материал, физико-механические свойства которого зависят от целого ряда факторов: структуры асфальтобетона, определяемой свойствами и количественным содержанием минеральной части смеси и вяжущего материала; технологии приготовления смеси — практика показывает, что при наличии исходных дорожно-строительных материалов с заданными свойствами, не всегда удается добиться стабильных прочностных показателей и требуемой долговечности асфальтобетонных покрытий, из-за целого ряда особенностей технологического характера при их устройстве и условий эксплуатации.

Для детального исследования влияния всех указанных факторов на физико-механические свойства асфальтобетона необходим комплексный показатель, максимально учитывающий степень их воздействия.

В настоящее время в качестве контролируемого показателя физико-механических характеристик асфальтобетона наиболее часто определяют предел прочности на сжатие. Это связано с тем, что испытание на сжатие при скорости деформирования 3 мм/мин нормировано СТБ 1033 [1]. Однако этот показатель не в полной мере отражает реальные эксплуатационные условия работы материала в дорожной конструкции [2]. Авторы полагают, что показателем, отвечающим вышеназванным условиям, может быть критерий усталостной повреждаемости асфальтобетона, определяемый при испытании по схеме растяжения при циклическом динамическом изгибе.

ВЫБОР РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ И НЕСТАНДАРТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА

При выборе режима испытания учитывались технологический и масштабный факторы, особенности изготовления образцов, а также условия испытания, определяемые видом напряженно-деформированного состояния, режимом нагружения, условиями воздействия окружающей среды и условиями термостатирования образцов. Таким режимом, отвечающим вышеуказанным условиям, является "жесткий" режим нагружения, при котором сохраняется постоянная амплитуда деформаций.

При оптимизации состава асфальтобетона помимо критерия усталостной повреждаемости определялись дополнительно как стандартные показатели качества в соответствии с [1], так и нестандартные — кратковременные статические испытания на растяжение при изгибе ($R_{из}$), растяжение при расколе (R_0), испытание на сжатие и сжатие в обойме (R_{50}) по схеме Маршалла. Так, испытание $R_{из}$ осуществлялось при скорости деформирования 50 мм/мин; это обосновано тем, что данный скоростной интервал создает зону линейной вязкоупругости для рассматриваемого материала согласно [3]. Испытание R_0 , необходимое для определения максимальной структурной прочности материала, согласно теории, описанной В. А. Веренько [4], выполняли при температуре минус 15 °С и скоростях деформирования 3 и 10 мм/мин. Испытание на сжатие при температуре 10 °С было выбрано ввиду того, что данная температура максимально приближена к условиям неблагоприятного осенне-весеннего периода для Республики Беларусь.

Таблица 1. Значения и уровни отобранных факторов в кодированных величинах

Обозначение факторов	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
x_1 – гранитный щебень фракции 5–10 мм, %	65	70	75	5
x_2 – минеральный порошок неактивированный, %	8	10	12	2
x_3 – битум БНД 60/90, %	6,1	6,3	6,5	0,2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной задачей оптимизации состава асфальтобетона, базирующейся на активном эксперименте и реализуемой при математическом планировании эксперимента [5], является установление допустимых отклонений содержания всех компонентов смеси. Применительно к задаче проектирования составов асфальтобетона важно знать, как математическое ожидание некоторой величины (сопротивление сжатию, изгибу и др.) связано со значениями факторов, определяющих их состав. При изучении связи "состав — свойство" для асфальтобетонов возможно проведение активного эксперимента в лабораторных условиях, изменяя по выбранному плану содержание компонентов смеси, из которых формируется испытываемый образец. При исследовании свойств асфальтобетона, например, типа ЩМС_ц-10, факторное пространство должно охватывать всевозможные композиции смеси, регламентированные техническими условиями [1].

Для реализации лабораторного эксперимента с целью получения связи "состав — свойство" выбран план, минимизирующий обобщенную дисперсию или эллипсоид рассеяния оценок и позволяющий осуществить аппроксимацию поверхности отклика. Естественной мерой качества построенной поверхности отклика является дисперсия величины $\eta(x_1, x_2, \dots, x_q)$, обозначаемая через $D(x_1, x_2, \dots, x_q)$, которая является функцией от аргументов x_1, x_2, \dots, x_q , задаваемой планом эксперимента. Значения аргументов представлены значениями нижних уровней (код "-1") факторов x_1, x_2, x_3 — 65,0 %; 8,0 %; 6,1 % и верхних уровней (код "+1") — соответственно 75,0 %; 12,0 %; 6,5 %, при неизменном основном уровне (код "0") — соответственно 70,0 %; 10,0 %; 6,3 % и приведены в таблице 1.

В каждой точке плана (см. таблицу 1) экспериментальным путем были получены величины, необходимые для регрессионного анализа характеристик качества асфальтобетона согласно [1], а также критерий усталостной повреждаемости. Величины характеристик качества были получены трехкратным проведением опыта в каждой точке плана и усреднением полученных результатов согласно требованиям [6].

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ НА КРИТЕРИЙ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Влияние компонентов асфальтобетонной смеси и их количества на критерий усталостной повреждаемости асфальтобетона оценивалось по результатам экспериментально-статистического моделирования. Расчет кубической модели D_{20} (аналогично можно рассчитать и другие Y_i) проводили в системе Statist [7]. Каждая модель проходила регрессионный анализ, проверку адекватности. По результатам испытаний на критерий уста-

лостной повреждаемости D_{20} была получена адекватная экспериментально-статистическая модель зависимости D_{20} от исследуемых факторов:

$$D_{20} = 1651,1318 + 10,2963 x_1^2 - 13,4656 x_2^2 + 1352,87 x_3^2 + 11,1688 x_1 \cdot x_2 - 250,759 x_1 \cdot x_3 - 75,6635 x_2 \cdot x_3 - 0,0536884 x_1^3 - 0,0485808 x_1^2 \cdot x_2 + 0,2540641 x_1^2 \cdot x_3 - 0,0694135 x_2^2 \cdot x_1 + 0,5597691 x_2^2 \cdot x_3 + 0,3195958 x_3^2 \cdot x_1 + 17,6537 x_3^2 \cdot x_2 + 8,020015 x_3^3 - 136,4767 x_3^3 - 0,521868 x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Анализ коэффициентов полиномиальной модели (1) показывает, что оптимальное содержание компонентов по D_{20} находится в области эксперимента. Анализ влияния факторов целесообразно вести в зоне оптимума функции отклика, т. е. рассматривать влияние каждого из факторов при условии стабилизации остальных на оптимальных уровнях, определенных из условий поиска оптимума функции диссоциативно-шаговым методом оптимизации. При этом целесообразно рассматривать два варианта анализа в диаметрально противоположных условиях, т. е. в областях максимума и минимума функции. В соответствии с основными положениями диссоциативно-шагового метода поиска оптимума [8] для критерия усталостной повреждаемости по модели (1) были определены координаты "точки" максимума и минимума, которые соответственно составляют: $x_1 = +1, x_2 = -1, x_3 = +1$; $x_1 = -0,5, x_2 = +0,5, x_3 = +1$.

На рис. 1–3 представлены зависимости, отражающие влияние каждого из исследованных факторов на D_{20} при их оптимальном содержании.

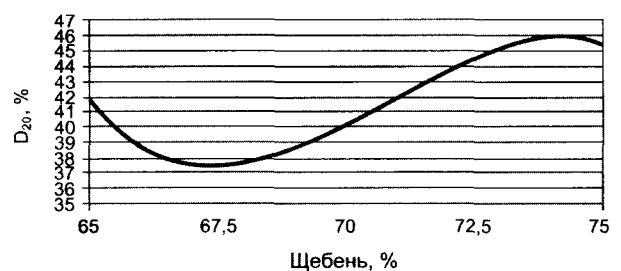


Рис. 1. Зависимость влияния щебня на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и битума в зоне максимальной долговечности

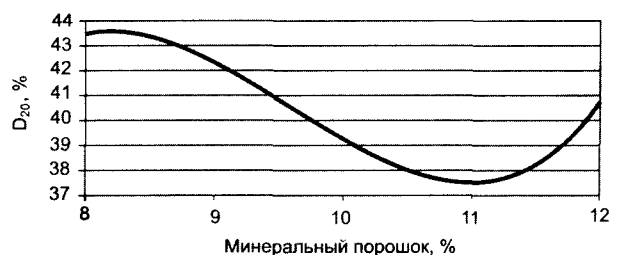


Рис. 2. Зависимость влияния минерального порошка на D_{20} при оптимальном содержании битума и щебня в зоне максимальной долговечности

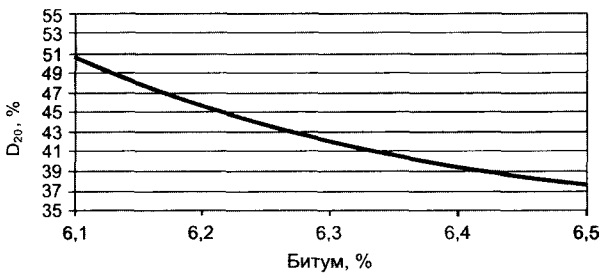


Рис. 3. Зависимость влияния битума на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и щебня в зоне максимальной долговечности

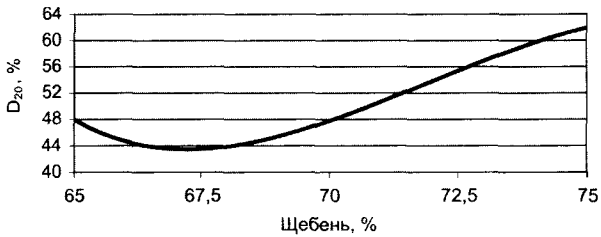


Рис. 4. Зависимость влияния щебня на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и битума в зоне минимальной долговечности



Рис. 5. Зависимость влияния минерального порошка на D_{20} при оптимальном содержании битума и щебня в зоне минимальной долговечности

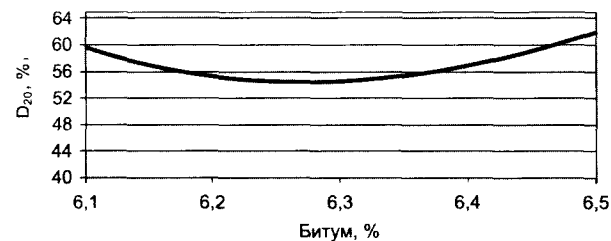


Рис. 6. Зависимость влияния битума на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и щебня в зоне минимальной долговечности

В частности, на рис. 1 показано влияние количества щебня на D_{20} . Установлено, что для обеспечения максимальной долговечности (15 лет, точка 3), количество щебня должно составлять 67,5 %; однако для обеспечения требуемой долговечности (14 лет) минимальное количество щебня (точка 2) составляет 66,0 %. Таким образом, установлен интервал количества щебня в смеси асфальтобетона типа ЩМС_ц-10, который составляет $x_1 = (66-69) \%$.

Аналогичное исследование модели D_{20} (1) было проведено для анализа влияния количества минерального порошка и битума (см. рис. 2, 3). Установлено, что количество этих компонентов асфальтобетона должно быть оптимальным. Малое количество минерального порошка в асфальтобетонной смеси не позволяет обеспечить достаточную долговечность, ве-

роятно, в силу того, что битумно-минеральная смесь не будет обладать требуемыми свойствами из-за несвязности определенной части битума порошком. Это приводит к наличию большого количества несвязных минеральных частиц битума, которые под влиянием циклической нагрузки выделяются на поверхности частиц заполнителя, тем самым ослабляя связь между структурными элементами. Введение минерального порошка в количествах, больших оптимального, приводит к тому, что часть битумно-минеральной смеси становится более жесткой и увеличивается вероятность образования не смоченных битумом групп минеральных частиц, которые при нагружении выступают в роли зародышевого дефекта, способного вырасти до опасных размеров при циклическом нагружении.

Отклонение от оптимальной концентрации битума (см. рис. 3) также оказывает влияние на критерий усталостной повреждаемости. Так, если битума в материале недостаточно, то существует опасность наличия в материале частиц и зерен, не обработанных вяжущим. Такие области материала являются технологическими (наследственными) дефектами, способными прорасти до опасных структурных уровней (размеров). В противоположность этому явлению наличие излишнего количества объемного битума увеличивает расстояние между минеральными частицами, а следовательно, снижается сила взаимодействия между последними. К тому же, вероятно, наличие объемного битума при колебаниях температуры среды увеличивает уровень внутренних напряжений, уменьшает коэффициент внутреннего трения, что ухудшает работоспособность асфальтобетона в условиях циклического нагружения. По уровню влияния по возрастанию на D_{20} факторы можно выстроить в следующей последовательности — $x_1 < x_2 < x_3$.

Аналогичное ранжирование по уровню влияния исследуемых факторов характерно и для их влияния в зоне минимума (рис. 4–6), для которой также свойственно наличие оптимума факторов. Минимум D_{20} находится в точке с координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$; это характерно для асфальтобетона с большой долей песка, малым количеством щебня, минерального порошка и битума. Вероятно, в таких условиях не достигается оптимальная толщина битумной пленки на зернах заполнителя в битумно-минеральной смеси. К тому же, песок не способен создать скелет асфальтобетона оптимальной жесткости, поэтому и усталостная долговечность такого материала очень низкая.

Анализ зависимости, представленной на рис. 1, позволил установить оптимальное содержание щебня в асфальтобетоне (67,5 %), при котором материал обладает максимальной усталостной долговечностью. Вероятно, такой эффект связан с оптимальной упаковкой частиц щебня, при которой образующийся скелет асфальтобетона способен рациональным образом воспринимать внешние нагрузки с минимальной опасностью для структуры материала в целом. Отмеченного для щебня постоянства оптимального содержания не наблюдается, если перейти к рассмотрению влияния минерального порошка и битума (см. рис. 2, 3). На рис. 2 показано изменение оптимального содержания минерального порошка x_{2opt} при увеличении доли битума. То же можно сказать и об оптимуме содержания битума x_{3opt} , который увеличивается с ростом содержания минерального порошка (см. рис. 3).

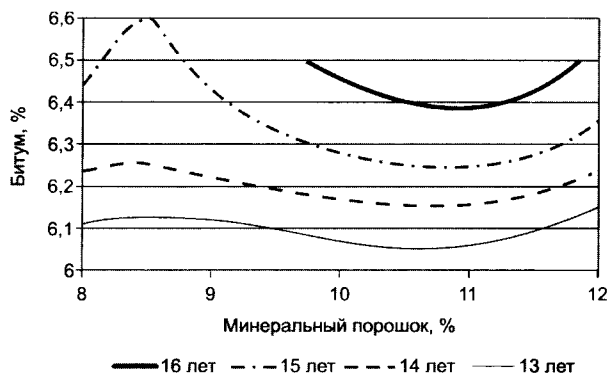


Рис. 7. Номограмма определения рациональных составов асфальтобетона с требуемой долговечностью

Таким образом, из приведенных графиков следует, что для обеспечения максимальной усталостной долговечности необходимо выполнить рациональную упаковку зерен щебня с обеспечением оптимального расстояния между ними и условий по качеству битумно-минеральной составляющей асфальтобетона. В ситуации, когда обеспечивается оптимальное количество щебня ($x_1 = -0,5$), использование графического образа модели, показывающей влияние минерального порошка

и битума (рис. 7), позволяет решить ряд технико-экономических задач — выбрать состав с минимальным содержанием битума, который обеспечивает заданную долговечность, например, 14 лет. Как видно из рис. 7, этому условию соответствует состав с содержанием битума порядка 6,15 % и минерального порошка 10,6 %. Обеспечение максимальной усталостной долговечности без лимитов экономического характера возможно в диапазоне дозирования минерального порошка 10,0 %–12,0 % и битума — 6,4 %–6,5 %. Таким образом, номографирование позволяет решать задачи выбора рациональных составов асфальтобетона с требуемой долговечностью. Однако, принимая во внимание, что к материалу асфальтобетонного покрытия предъявляются требования и по прочностным показателям, окончательный выбор рационального состава асфальтобетона требует принятия компромиссного решения.

ВЫВОДЫ

По возрастанию степени влияния компонентов асфальтобетона на критерий усталостной повреждаемости D_{20} в зоне его максимальной и минимальной долговечности установлена следующая последовательность: x_1 — содержание щебня; x_2 — содержание минерального порошка; x_3 — содержание битума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033-2004. — Минск: Минстройархитектуры, 2004. — 24 с.
2. Руденский, А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А. В. Руденский. — М.: Транспорт, 1992. — 253 с.
3. Золотарев, В. А. Закономерности деформирования и разрушения битумов и асфальтобетонов как основа улучшения и регулирования их свойств: дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.05. — Харьков, 1983. — 489 с.
4. Надежность дорожных одежд: пособие / В. А. Веренько. — Минск: БГПА, 2002. — 120 с.
5. Зедгенидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных смесей / И. Г. Зедгенидзе. — М.: Наука, 1976. — 390 с.
6. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115-2004. — Минск: Минстройархитектуры, 2004. — 36 с.
7. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.
8. Вознесенский, В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В. А. Вознесенский [и др.]. — Киев: Будівельник, 1983. — 144 с.

Статья поступила в редакцию 12.10.2009.