

ОЦЕНКА УПЛОТНЯЕМОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

В области тестирования дорожно-строительных материалов существует большое количество методов испытания по определению физико-механических свойств битумных вяжущих и асфальтобетонов, служащих для получения и обеспечения более высоких эксплуатационных показателей асфальтобетона (при низких температурах – трещиностойкости, при высоких – колееустойчивости, при средних – сопротивления к усталости).

Считается, что асфальтобетон, который обладает всеми этими свойствами, будет характеризоваться высокой долговечностью и длительным сроком эксплуатации. Для того чтобы обеспечить эти свойства в покрытии, необходимо качественно уплотнить асфальтобетонную смесь на дороге. По данным института NCAT, увеличение относительной плотности в асфальтобетоне на 1% (с 92% до 93%) улучшает усталостные характеристики покрытия на 8,2–43,8%, повышает сопротивление колееобразованию на 7,3–66,3% и увеличивает срок службы на 10% [1]. Таким образом, для достижения более длительного срока эксплуатации покрытия необходимо создавать и обеспечивать условия для качественного уплотнения асфальтобетонных смесей на дороге.

Помимо этого, в Европе и США все чаще стали применять теплые асфальтобетонные смеси, которые хорошо укладываются и уплотняются при температуре на 20–40°C ниже, чем традиционные горячие асфальтобетонные смеси. Применение теплых смесей связано с экологическими и технологическими аспектами: ужесточение требований к допустимым вредным выбросам в окружающую среду, воздействие на человека и экономия топлива при производстве. В наших климатических условиях есть и другие преимущества применения теплых асфальтобетонных смесей, которые особо актуальны в холодный и переходный период года. Снижение тем-

пературы укладки и уплотнения смеси позволяет увеличить продолжительность строительного сезона без ухудшения качественных характеристик покрытия.

В весенне-осенний период асфальтобетонную смесь выпускают с завода с температурой на верхнем допустимом пределе, поскольку погодные условия способствуют быстрому остыванию смеси и ухудшению ее удобоукладываемости и уплотняемости, что может привести к возникновению брака. При использовании теплых асфальтобетонных смесей, выпущенных не при пониженной, а при стандартной рабочей температуре (140–160 °C) мы получим значительный запас времени на транспортировку, укладку и уплотнение смеси до требуемой нормируемой плотности. Производство таких смесей осуществляется с применением различных химических добавок, модификаторов или по технологии вспенивания битумного вяжущего.

В результате возникает закономерный вопрос, каким образом оценить влияние различных добавок, модификаторов и пр. на удобоукладываемость и уплотняемость асфальтобетонных смесей на стадии выбора, подбора материалов и проектирования составов. Существует большое количество методов оценки физико-механических свойств асфальтобетона, но практически нет методик по определению технологических параметров: удобоукладываемость и

уплотняемость. Таким образом, налицо острая необходимость в оценке уплотняемости асфальтобетонной смеси в лаборатории.

В американском отчете NSHRP 714 [2] «Специальный метод проектирования для теплых асфальтобетонных смесей» предлагается следующая методика оценки уплотняемости как технологического параметра. Уплотняемость смеси оценивается путем уплотнения двух образцов при запланированной температуре уплотнения и двух образцов на 30°C ниже запланированной температуры уплотнения. Количество оборотов, необходимое для достижения 8% воздушных пустот, определяется для двух наборов образцов. Рекомендуется, чтобы увеличение числа оборотов, необходимых для достижения 8% воздушных пустот между запланированной температурой уплотнения и на 30°C ниже запланированной температуры уплотнения, составляло менее 25% от числа оборотов при запланированной температуре уплотнения. Процедура подробно описана ниже:

1. Подготовьте достаточное количество проектируемой асфальтобетонной смеси необходимой для изготовления четырех гираторных образцов и измерения максимальной плотности смеси.
2. Определите теоретическую максимальную плотность смеси (G_{mm}) в соответствии со стандартом ПНСТ 92 (AASHTO T 209).
3. Уплотните на гираторе как минимум 2 образца при запланированной температуре до числа оборотов $N_{проект}$ в соответствии с ПНСТ 112 (AASHTO T 312) с автоматической фиксацией высоты образца для каждого вращения.
4. Остудите смесь до температуры на 30°C ниже температуры уплотнения. Уплотните на гира-

торе как минимум 2 образца до числа оборотов $N_{проект}$ по ПНСТ 112 (AASHTO T 312) с автоматической фиксации высоты образца для каждого вращения.

5. Определите объемную плотность для каждого образца в соответствии с ПНСТ 166 (AASHTO T 166).

6. Для каждого образца определяют высоту при относительной плотности 92,0% с использованием уравнения 1.

$$h_{92} = h_d \times \left(\frac{\%G_{mm,d}}{92} \right) \quad (1)$$

где h_{92} – высота при относительной плотности 92%, мм;

h_d – высота, измеренная гиратором при числе оборотов $N_{проект}$, мм;

$\%G_{mm,d}$ – относительная плотность при числе оборотов $N_{проект}$, %.

7. Для каждого образца определяется количество вращений до достижения 92% относительной плотности. Это можно сделать, посмотрев на данные гираторного уплотнителя, фиксирующего высоту образца в зависимости от числа оборотов. Определите количество оборотов на высоте, где относительная плотность составляет 92% – h_{92} , как определено в пункте 6.

8. Определите гираторный коэффициент (температурный коэффициент уплотняемости) с помощью уравнения 2.

$$GR = \frac{N_{92(T-30)}}{N_{92(T)}} \quad (2)$$

где GR – температурный коэффициент уплотняемости (гираторный коэффициент);

$N_{92(T-30)}$ – число оборотов гиратора при 92% относительной плотности и температуре на 30°C ниже запланированной температуры уплотнения;

$N_{92(T)}$ – число оборотов гиратора при 92% относительной плотности и запланированной температуре уплотнения.

Уплотняемость считается приемлемой, если температурный коэффициент уплотняемости меньше или равен 1,25. То есть количество оборотов гиратора при темпера-

туре на 30°C ниже температуры уплотнения не должно превышать 25% количества оборотов гиратора для достижения относительной плотности в 92% при запланированной температуре уплотнения.

Данная методика позволяет оценить способность смеси уплотняться при понижении температуры на 30°C – температурную уплотняемость, но в то же время не дает возможности проанализировать жесткость самой смеси в процессе ее уплотнения (определить, какое количество энергии необходимо затратить для достижения требуемого уплотнения). Для решения этого вопроса дополнительно были рассмотрены два подхода. Первый – это оценка уплотняемости асфальтобетонной смеси через комплексный коэффициент уплотнения, через расчет угла наклона кривой уплотнения в логарифмических координатах (рис. 1) (формула 3). Подробнее этот подход рассматривается в статье [3].

$$K = \frac{G_{пр.} - G_{нач.}}{\ln N_{пр.} - \ln N_{нач.}} \times 100 \quad (3)$$

где K – комплексный коэффициент уплотняемости, %;

$G_{пр.}$ – относительная плотность образца при количестве оборотов $N_{пр.}$ проектного уровня;

$G_{нач.}$ – относительная плотность образца при количестве оборотов $N_{нач.}$ начальном уровне; $N_{пр.}$, $N_{нач.}$ – число оборотов гиратора на проектном и начальном уровне.

Данный метод позволяет оценивать общую жесткость, уплотняемость смеси без разделения процесса уплотнения на гираторе на технологический этап и эксплуатационный. Чем ниже комплексный коэффициент, тем больше смесь склонна к уплотняемости и тем быстрее смесь уплотнится катками, а в процессе эксплуатации будет деформироваться под движением автомобильного транспорта.

Основным недостатком данной методики является то, что она не учитывает количество вовлеченного вяжущего в асфальтобетонную смесь. В результате был предложен показатель: произведение комплексного коэффициента уплотняемости на содержание воздушных пустот (формула 4), но, как говорилось выше, по данному выражению оценивается одновременно и технологическая уплотняемость, и эксплуатационная стойкость к колееобразованию, что не позволяет в целом оценить

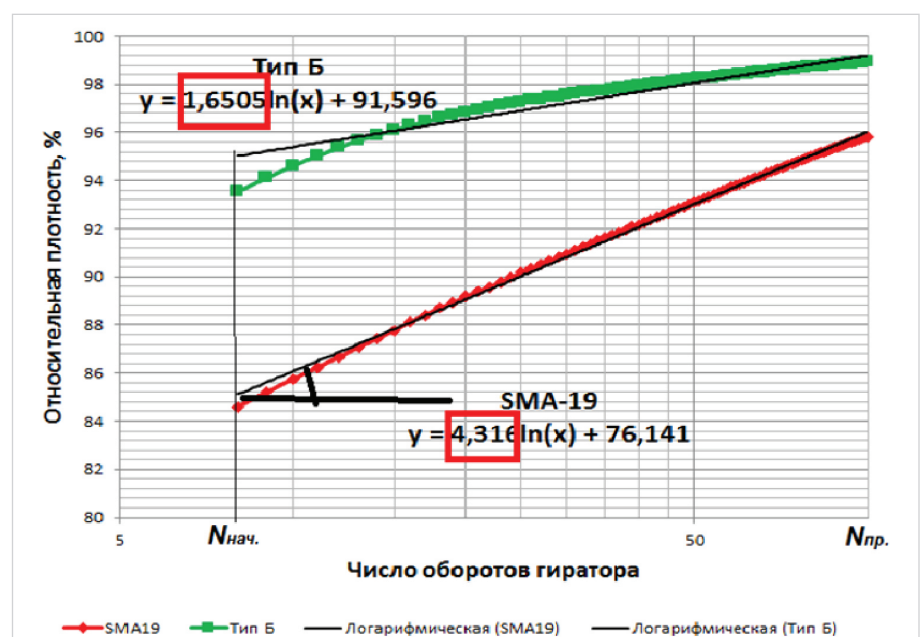


Рис. 1. Оценка уплотняемости асфальтобетона по гиратору через угол наклона кривой уплотнения в логарифмических координатах: красный цвет – смесь с высоким коэффициентом уплотняемости 4,316 (жесткая смесь); зеленый цвет – смесь с низким коэффициентом уплотняемости 1,650 (мягкая смесь)

и прогнозировать именно удобоуплотняемость смеси.

$$K \times V_a \quad (4)$$

где K – комплексный коэффициент уплотняемости смеси по формуле (3);

V_a – содержание воздушных пустот (остаточная пористость) в уплотненном асфальтобетонном образце при $N_{пр}$.

Второй подход был предложен профессором Хусейном Бахия (директор Центра исследования модифицированных вяжущих, США, Висконсин) [4]. Кривая уплотнения разбивается на два участка, две стадии: первая – технологическая, вторая – эксплуатационная. Технологическая стадия рассматривается как стадия уплотнения, от начального числа оборотов гиратора $N_{нач}$ до достижения 92% относительной плотности. В США принято считать плотность 92% минимально приемлемой степенью уплотнения на дороге, а уплотнение до числа оборотов $N_{нач}$ – это работа по уплотнению асфальтобетонной смеси рабочими органами асфальтоукладчика. Для проведения анализа технологичности смеси предлагается коэффициент CEI (Construction Energy Index) – «индекс энергии уплотнения», рассчитываемый как площадь под кривой уплотнения (формула 5).

$$CEI = \sum_{i=N_{нач.2}}^{N_{92}} \frac{1}{2} \times [(G_i - G_{N_{нач.}}) + (G_{i+1} - G_{N_{нач.}})] \times (N_{i+1} - N_i) \quad (5)$$

где CEI – Construction Energy Index – индекс энергии уплотнения;

G_i – относительная плотность образца при количестве оборотов N_i

G_{i+1} – относительная плотность образца при количестве оборотов N_{i+1}

$G_{нач.}$ – относительная плотность образца при количестве оборотов $N_{нач.}$

$N_{нач.}$ – число оборотов гиратора на начальном уровне;

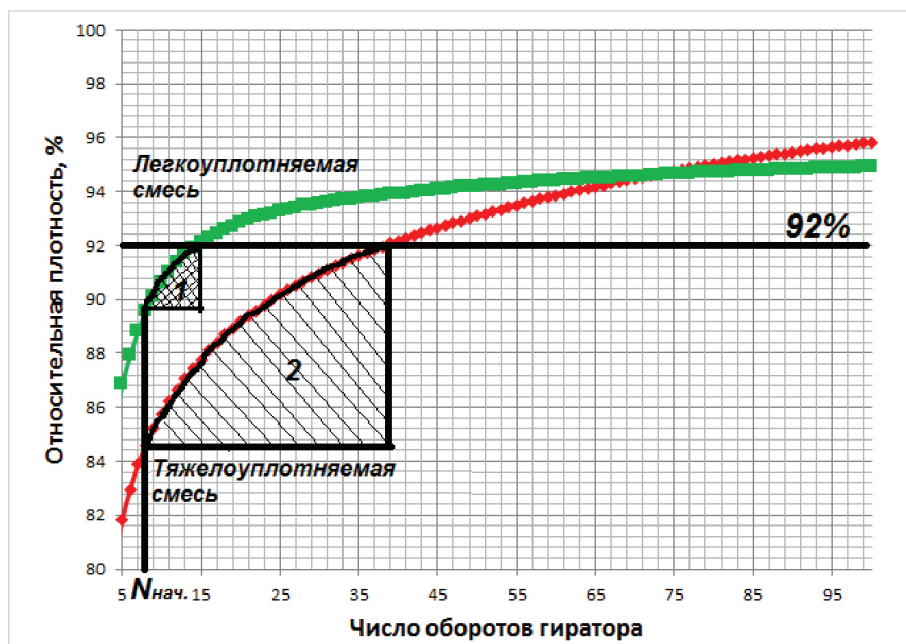


Рис. 2. Оценка уплотняемости асфальтобетонной смеси в гираторе, по кривым уплотнения (1 – легкоуплотняемая смесь, зеленая кривая; 2 – тяжелоуплотняемая смесь, красная кривая)

N_{92} – число оборотов гиратора при 92% относительной;

$N_{i+1} - N_i = 1$.

В качестве примера на рис. 2 приведены две кривые уплотняемости асфальтобетонных смесей. Красным цветом показана тяжелоуплотняемая смесь: здесь большая площадь под кривой уплотнения (2) и соответственно будет большой индекс энергии уплотнения (CEI). Зеленым цветом представлена легкоуплотняемая смесь с малой площадью под кривой (1) и малым коэффициентом CEI, на изготовление образцов из такой смеси гиратором было затрачено меньше энергии. Следовательно, на дороге данная смесь будет быстрее и легче уплотняться под катками. При этом, если рассмотреть участки дальнейшего уплотнения, выше 92%, характеризующие эксплуатационную стадию, то асфальтобетонная смесь (красная кривая), несмотря на высокую технологическую жесткость, продолжает набор плотности, в то время как зеленая кривая (легкоуплотняемая смесь) после уплотнения до 92% значительно замедляет рост плотности и становится более жесткой, а следовательно, более устойчивой к колеобразованию.

В Центральной лаборатории АО «ВАД» были проведены работы по оценке влияния различных адгезионных присадок, ПАВ и модификаторов на уплотняемость асфальтобетона. Были проверены 20 различных вариантов смесей с присадками и модификаторами, проведена оценка по описанным выше методикам уплотняемости и удобоукладываемости. Для снижения влияния на результат зернового состава смеси использовались отсева дробления горных пород гранит (табл. 1) и диабаз (табл. 2). Смесей приготавливались в одинаковых условиях, термостатировались в течении двух часов при температуре 135°C, после чего проводилось уплотнение на гираторе. Вторую часть смеси охлаждали до температуры 105°C и также подвергали уплотнению на гираторе до 50 оборотов. Результаты уплотнения фиксировались, подвергались анализу и расчету в соответствии с предложенными выше методиками. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Как видно из приведенных в таблицах данных, адгезионные присадки ПАВ и модифицирующие добавки имеют значительное влияние на уплотняемость асфальтобетонных смесей. Это подтверждает правильность мероприятий,

Наименование материала, состав	Комплексный коэффициент уплотняемости K, наклон прямой уплотнения, (формула 3)		Произведение $K \times V_{a'}$ (формула 4)		CEI Индекс энергии уплотнения Construction Energy Index (формула 5)		GR, гираторный коэффициент (формула 2)	GR _{CEI} Гираторный коэффициент (формула 6)
	135°	105°	135°	105°	135°	105°		
1. Гранит, БНД 70/100	9,8	10,7	68,8	89,0	175,3	358,1	1,45	2,04
2. Гранит, БНД 70/100 + 0,3% Амдор 9	9,2	10,7	61,0	78,3	144,6	249,8	1,29	1,73
3. Гранит, БНД 70/100 + 0,3% Амдор 10	10,4	10,5	66,5	69,7	141,2	163,1	1,09	1,16
4. Гранит, БНД + 0,8% Honeywell Titan	9,3	10,7	57,5	77,7	99,1	218,6	1,43	2,21
5. Гранит, БНД70/100 + 1,2% Viscobit	10,9	10,8	68,4	78,1	140,2	214,5	1,26	1,53
6. Гранит, БНД + 1,2% Viscobit + 0,3% Амдор9	9,2	10,2	59,1	69,9	114,2	168,2	1,16	1,47
7. Гранит, БНД 70/100 + 0,3% Адгезол 6	9,8	10,6	66,8	78,4	159,7	228,7	1,17	1,43
8. Гранит, БНД 70/100 + 0,3% Адгезол 6Т	9,8	10,9	68,0	82,1	166,8	252,9	1,19	1,52
9. Гранит, БНД 70/100 + 0,3 % WetFix BE	9,5	10,1	63,7	70,5	139,4	180,6	1,12	1,30
10. Гранит, БНД 70/100 + 0,3% WetFix AP47	9,4	10,2	55,6	68,4	88,9	161,0	1,30	1,81
11. Гранит, БНД70/100 + 0,3% Афтисотдор Тип Б	10,2	10,4	67,6	71,3	148,7	177,5	1,12	1,19
12. Гранит, БНД70/100 + 0,3% Афтисотдор Тип С	9,5	10,7	64,7	80,9	152,1	256,7	1,25	1,69
13. Гранит, БНД70/100 + 0,15% Iterlene SL100+	10,3	10,3	68,2	72,1	148,5	185,6	1,15	1,25

Табл. 1. Коэффициенты уплотняемости смесей, приготовленных на каменном материале (гранит)

указанных еще в СНиП 3.06.03-85, о применении ПАВ при укладке смеси при пониженных температурах окружающего воздуха.

Анализ полученных результатов показывает высокую чувствительность индекса энергии уплотнения (CEI) к изменению в составе вяжущего материала в смеси. Это позволило использовать для оценки температурной уплотняемости гираторный коэффициент

ент, рассчитанный по индексу энергии уплотнения, по аналогии с формулой 2 и приведенной в формуле 6.

$$GR_{CEI} = \frac{CEI_{(T-30)}}{CEI_{(T)}} \quad (6)$$

где GR_{CEI} – температурный коэффициент уплотняемости (гираторный коэффициент) по индексу энергии уплотнения CEI; $CEI_{(T-30)}$ – индекс энергии уплотнения при температуре на 30°С ниже

запланированной температуры уплотнения;

$CEI_{(T)}$ – индекс энергии уплотнения при запланированной температуре уплотнения.

В результате был рассчитан температурный коэффициент уплотняемости GR_{CEI} (столбец 9, табл. 1 и 2), построен график (рис. 3), получена линейная зависимость коэффициентов, определена корреляция и вычислено, что при $GR = 1,25$ (тре-

Наименование материала, состав	Комплексный коэффициент уплотняемости K, наклон прямой уплотнения, (формула 3)		Произведение K×Va, (формула 4)		CEI Индекс энергии уплотнения Construction Energy Index (формула 5)		GR, гираторный коэффициент (формула 2)	GR _{CEI} Гираторный коэффициент (формула 6)
	135°	105°	135°	105°	135°	105°		
1. Диабаз, БНД 70/100	10,5	10,7	67,9	77,3	150,8	236,8	1,24	1,57
2. Диабаз, ПБВ60	11,4	12,1	63,0	82,2	96,0	178,6	1,32	1,86
3. Диабаз, БНД 70/100 + 1,2 % Viscobit	10,5	11,4	51,8	62,8	75,9	114,8	1,17	1,51
4. Диабаз, БНД + 1,2% Viscobit + 0,3% Амдор9	11,7	11,3	59,2	62,4	96,5	113,8	1,12	1,18
5. Диабаз, БНД 70/100 + 0,8% Honeywell Titan	9,7	10,6	40,0	51,0	39,3	6,6	1,24	1,57
6. Диабаз, БНД 70/100 + 0,3% Адгезол 6	11,3	11,2	56,3	63,2	78,5	121,5	1,21	1,55
7. Диабаз, БНД70/100 + 0,15% Iterlene SL100+	11,5	10,9	62,8	65,4	117,8	133,0	1,11	1,13

Табл. 2. Коэффициенты уплотняемости смесей, приготовленных на каменном материале (диабаз)

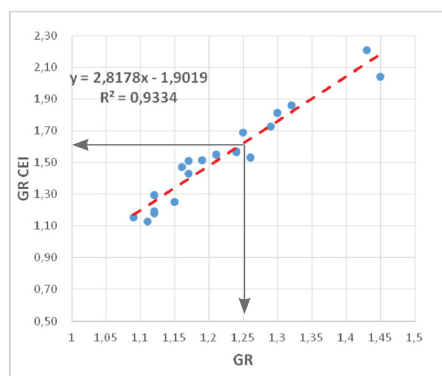


Рис. 3. Зависимость температурных коэффициентов уплотняемости (гираторных коэффициентов)

бование методики оценки работоспособности добавок для теплых смесей [2]) значение GR_{CEI} будет равным 1,60.

Выводы

В рамках данной работы проведен анализ существующих методов оценки технологических свойств смеси с использованием гирато-

ра, показана эффективность использования температурного коэффициента (гираторного коэффициента) GR в определении температурной уплотняемости смеси. Показано, что наиболее чувствительным методом является определение гираторного коэффициента через индекс энергии уплотнения (CEI). В качестве критерия оценки работоспособности добавки, определения температурной уплотняемости и признания асфальтобетонной смеси удобоуплотняемой предлагаем принять температурный коэффициент уплотняемости (гираторный коэффициент) по индексу энергии уплотнения CEI (GRCEI), который должен составлять не более 1,6.

Адгезионные присадки ПАВ и модификаторы в различной степени влияют на уплотняемость асфальтобетонной смеси, но оказывают

более высокое влияние на технологичность в сочетании с восками.

В дальнейшем предлагается провести исследования смесей с различными зерновыми составами минеральной части, провести ранжирование смесей по технологической жесткости через индекс энергии уплотнения (CEI) – легкоуплотняемая, среднеуплотняемая, тяжелоуплотняемая (или жесткая) и неуплотняемая (сверхжесткая) смесь и рекомендовать учитывать данный показатель при выборе оптимальной технологии уплотнения.

Д.А. Колесник,
руководитель
группы исследования
строительных материалов,
С.А. Мантопкин,
начальник центральной
лаборатории,
АО «ВАД»

Список литературы:

1. <https://pdfs.semanticscholar.org/1315/7a5304f8ac9091e8cf4c297155e0ca8c9821.pdf>.
2. Sterling, VA, «Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm-Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary» NCHRP Report 714, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 2012.
3. Колесник Д.А., Пахаренко Д.В. Методы испытания асфальтобетона (Часть 1. Уплотнение) // Дорожная держава. – № 45. – 2013. – С. 64–68.
4. H.U. Bahia, B. C. Paye – Using Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures. Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02. – October 2004.