

УДК 625.855

КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УПЛОТНЕНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В.А. Золотарев, проф., д.т.н., В.П. Корюк, м.н.с.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Рассмотрен процесс уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой. Показана роль давления и скорости уплотнения, температуры, состава асфальтобетонных смесей в обеспечении плотности асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, уплотнение, скорость и этапы укатки, вязкость асфальтовяжущего, зацепление.

ЯКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СТРУКТУРНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА УЩІЛЬНЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ

В.О. Золотарьов, проф., д.т.н., В.П. Корюк, м.н.с.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто процес ущільнення асфальтобетонних сумішей укоченням. Показано роль тиску, швидкості укочення, температури, складу асфальтобетонних сумішей в забезпеченні щільності асфальтобетону.

Ключові слова: асфальтобетонна суміш, ущільнення, швидкість і етапи укочення, в'язкість асфальтов'язучого, зачеплення.

QUALITATIVE ASSESSMENT OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS INFLUENCE ON COMPACTION OF ASPHALT-CONCRETE MIXTURES

V. Zolotariov, Prof., D. Sc. (Eng.), V. Koryuk, Jr. Researcher,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The process of compaction of asphalt-concrete mixtures by rolling is considered. The role of pressure and compaction rate, temperature, and composition of asphalt-concrete mixtures in providing asphalt concrete density is shown.

Key words: asphalt-concrete mixture, compaction, speed and stages of rolling, viscosity of asphalt-binding substances, adhesion.

Введение

Асфальтобетон – это монолитный материал, который образуется при достижении уплотненной асфальтобетонной смесью температуры окружающего воздуха. Это понятие подчеркивает важнейший технологический фактор, благодаря которому любая смесь минеральных материалов с битумным вяжущим становится бетоном, т.е искусственным

монолитом с определенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Полученная после смешения смесь является рыхлой системой, обладающей определенной насыпной массой, которая после охлаждения может образовать ноздревато-пористый камень с очень большой пустотностью (в пределах 20–30 %), который, даже будучи уло-

женным ровным слоем, не может выполнять своего предназначения – обеспечивать комфортный проезд по нему разнообразных видов транспорта и эксплуатационные свойства покрытия.

Уплотненная смесь даже из рационально подобранных минеральных материалов имеет пористость от 15 до 22 %. Около 75–85 % пустот минерального остова заполняются битумом. Для получения остаточной пористости от 2 до 5 % (в случае плотных асфальтобетонных) рыхлая смесь (за исключением литой) должна быть уплотнена с помощью специальных средств. За длительное, около 180 лет, время использования асфальтобетонных смесей технологический процесс уплотнения непрерывно развивался – от трамбовок и деревянных катков до вибро- и пневмоуплотнителей. В настоящее время используются гладкие барабанные металлические катки, катки с вертикальной и горизонтальной вибрацией, пневмокатки с саморегулирующимся давлением в пневмоколесах от 1 до 5 кгс/см².

Цель и постановка задачи

Целью работы является описание, на основе экспериментальных данных и данных литературных источников, механизма уплотнения с учетом роли битумного вяжущего и асфальтовяжущего, гранулометрического состава, давления, скорости и температуры уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой.

Анализ публикаций

Сутью процесса уплотнения является обеспечение максимально компактного расположения в дорожном слое полифракционных зерен, покрытых битумной пленкой. В смеси пленка имеет большую толщину, соответственно битум на большом расстоянии от поверхности каменных материалов находится в объемном состоянии, а каменные зерна не образуют компактный остов.

В процессе уплотнения битум должен быть вытеснен в межзерновое пространство настолько, чтобы толщина пленки стала такой, при которой контакт минеральных дисперсных зерен минерального порошка осуществлялся бы по слоям структурированного битума. При этом часть зерен минерального порошка с адсорбированным на них битумом переходит в пространство между более крупными зернами, обеспечивая их склеива-

ние. Идеальным является такое расположение зерен, когда мелкие зерна заполняют пустоты между более крупными. Этому способствуют существующие методы расчёта минеральной части асфальтобетонных смесей по зависимостям, установленным В.В. Охотиным – Н.Н. Ивановым, В. Фуллером – С. Томпсоном и др. [1, 2].

Влияние структурных и технологических факторов на уплотняемость

После уплотнения из смеси образуется асфальтобетон, имеющий макро-, мезо- и микроструктуру. Каждая из этих структур, в зависимости от содержания формирующих их структурообразующих элементов (макро – зерна щебня, мезо – песчаные зерна, микро – частички минерального порошка мельче 0,071 мм (0,063 мм в Европе и США)), формирует три типа подструктур – базальную, переходного типа и контактную [3]. При этом определение «контактная» не означает, что контакты должны осуществляться непосредственно между самими минеральными зёрнами. Любые контакты в асфальтобетонах разных типов осуществляются посредством разной степени структурированного битума, т. е. асфальтовяжущего вещества.

Наиболее простым способом уплотнения является давление от уплотняющего средства на слой смеси, которое приводит к уменьшению расстояния между зёрнами разных размеров (рис. 1). При этом сопротивление перемещению оказывают вначале пленки объемного, а затем и структурированного битума. Крупные зерна должны перемещать в менее плотное пространство мелкие зерна, перемещать или огибать близкие по размеру зерна, а также преодолевать зацепление зерен друг за друга. По мере сближения зерен и повышения плотности уплотняемого слоя его сопротивление дальнейшему утончению растёт. Для преодоления этого сопротивления давление должно увеличиваться. Эти взаимосвязь и взаимозависимость имеют место до приобретения слоем проектной плотности, оцениваемой по средней плотности, остаточной пористости или водонасыщению. В производственных условиях это регулируется коэффициентом уплотнения, представляющим собой отношение плотности, достигнутой в покрытии, к плотности, запроецированной на стадии подбора состава, или плотности, нормируемой для определенной смеси стандартами.

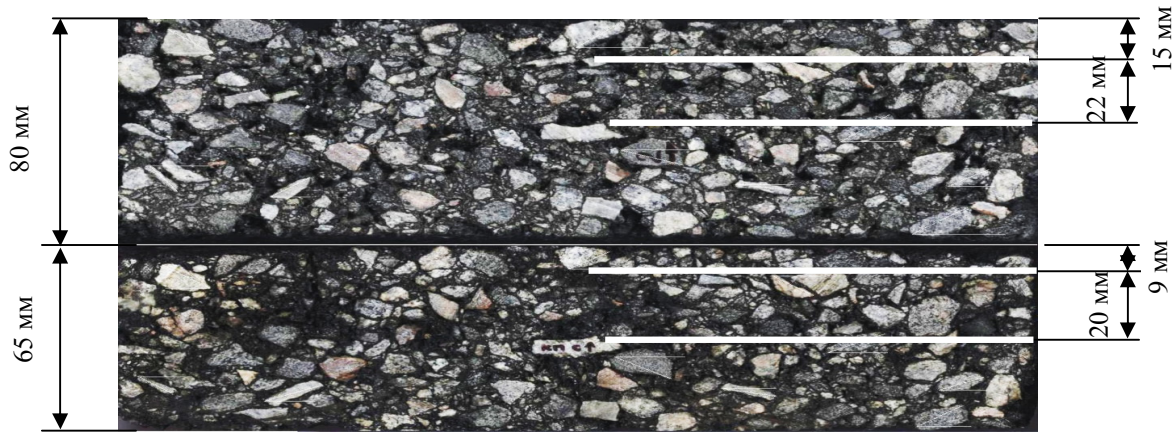


Рис. 1. Взаимное расположение зерен каменных материалов в асфальтобетонной смеси до уплотнения (вверху) и после уплотнения (внизу)

В соответствии с этим эффект уплотнения будет наблюдаться при условии

$$\sigma_{\text{упл}} = \sigma_3 + \sigma_6, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{упл}}$ – уплотняющее давление; σ_3 – сопротивление перемещению зерен; σ_6 – сопротивление битума выдавливанию.

Сопротивление зерен перемещению может быть учтено уравнением Кулона, используемым для описания процесса уплотнения грунтов и сдвигустойчивости асфальтобетонов:

$$\sigma_3 = P \cdot \text{tg}\varphi + C, \quad (2)$$

где φ – угол трения в асфальтобетонной смеси; P – уплотняющее давление; C – зацепление зерен.

Сопротивление слоев битума выдавливанию в первом приближении может быть учтено формулой Ньютона

$$\sigma_6 = \eta \cdot \dot{\varepsilon}, \quad (3)$$

где η – вязкость битума; $\dot{\varepsilon}$ – скорость выдавливания битума из зазоров между минеральными зернами и скольжения зерен по слоям битума друг относительно друга.

В результате общее условие уплотнения может быть представлено суммой сопротивлений

$$\sigma_{\text{упл}} \geq \eta \cdot \dot{\varepsilon} + P \cdot \text{tg}\varphi + C. \quad (4)$$

В случае, если уплотняющее давление будет меньше или равно сумме сопротивлений, оказываемых асфальтобетонной смесью, уплотнения не происходит. Для продолжения уплотнения и сохранения условия уравнения необходимо увеличить уплотняющее давление за счет увеличения вертикальной нагрузки, по аналогии с производственным уплотнением легкими, средними и тяжелыми катками (рис. 2).

Это условие имеет прогностический характер, поскольку практически все его составляющие до настоящего времени являются величинами гипотетическими. Гипотетичность вязкости связана прежде всего с тем, что в реальной смеси битум присутствует в виде асфальтовязущего вещества. Следовательно, должна учитываться вязкость конкретного асфальтовязущего при высокой технологической температуре.

Определение вязкости при такой температуре усложняется опасностью расслоения асфальтовязущего в ротационных узлах, повышением аномалии течения (отклонения от Ньютоновского течения), тем большим, чем больше отношение порошка к битуму (рис. 3), и в связи с необходимостью испытаний при высоких скоростях сдвига, приближающихся к скоростям производственного уплотнения.

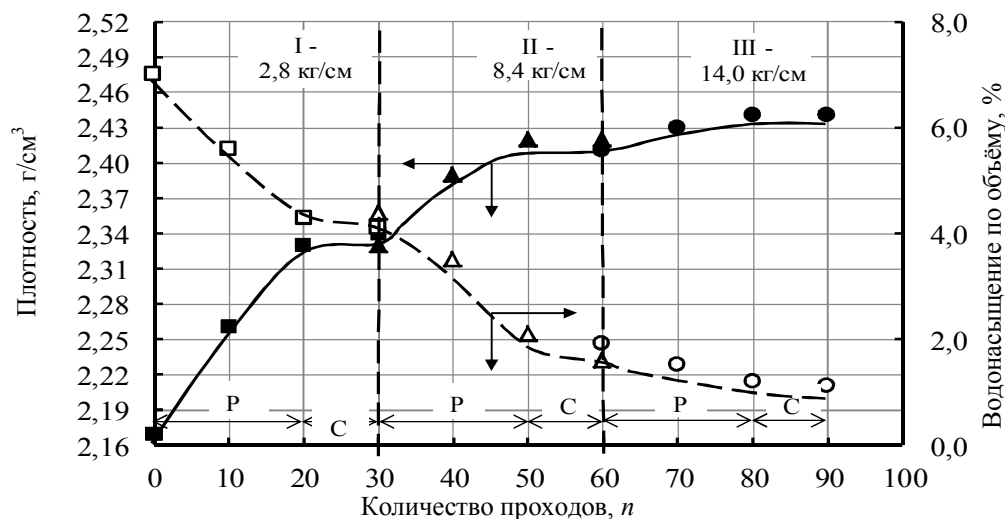


Рис. 2. Влияние количества проходов и линейного давления (■ – 2,8 кг/см; ▲ – 8,4 кг/см; ● – 14 кг/см (P – рост; C – стабилизация)) на показатели средней плотности и водонасыщения асфальтобетона типа А [4]

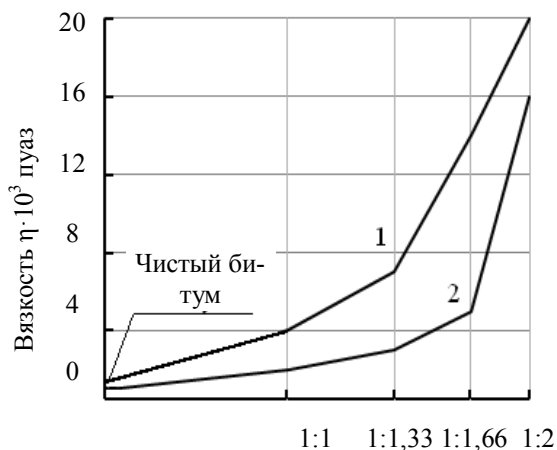


Рис. 3. Зависимость вязкости асфальтовяжущего от степени наполнения его порошком: 1 – при температуре 40 °C; 2 – при температуре 80 °C

Дополнительным усложняющим обстоятельством учета вязкости является неопределенность схемы течения в межзерновом пространстве: выдавливание – сжатие и разнонаправленный сдвиг, что требует установления соотношения показателей вязкости и учета особенностей течения по разным схемам. Упрощающим обстоятельством является практическая возможность определения отношения порошка к битуму (П/Б), как для проектируемых смесей, так и изъятых из дорожного покрытия, а также учета скорости деформаций слоев на основе технических данных уплотняющих средств, применяемых

в лаборатории или в производственных условиях. При этом практическое значение отношений П/Б колеблется в относительно небольших пределах – от 1:1 (для многощебеночнощебеночных и щебеночных мастичных смесей) до 2,5 (для малощебеночных смесей), а величина вязкости асфальтовяжущего изменяется в разы. Вместе с этим существует возможность определения вязкости смеси в процессе перемешивания в мешалке или при испытании смеси на удобоукладываемость по методу [5].

Вязкостная составляющая условия (4) уплотнения позволяет предсказывать степень уплотнения и скорость уплотнения: чем больше (ε) , тем больше сопротивление (σ_0) слоя уплотнению (рис. 4). Следовательно, при больших скоростях необходимо увеличивать давление уплотняющих средств (катков) и наоборот. Для каждого отдельного вида, типа и состава смеси должно существовать определенное соотношение между скоростью и массой уплотняющего средства, учитывающее эффективность уплотнения и опасность трещино- или волнообразования. Повышение уплотняемости при понижении скорости (рост времени контакта) связано также с повышением релаксации напряжений в слое, уменьшением его сопротивления уплотняющему воздействию (рис. 4).

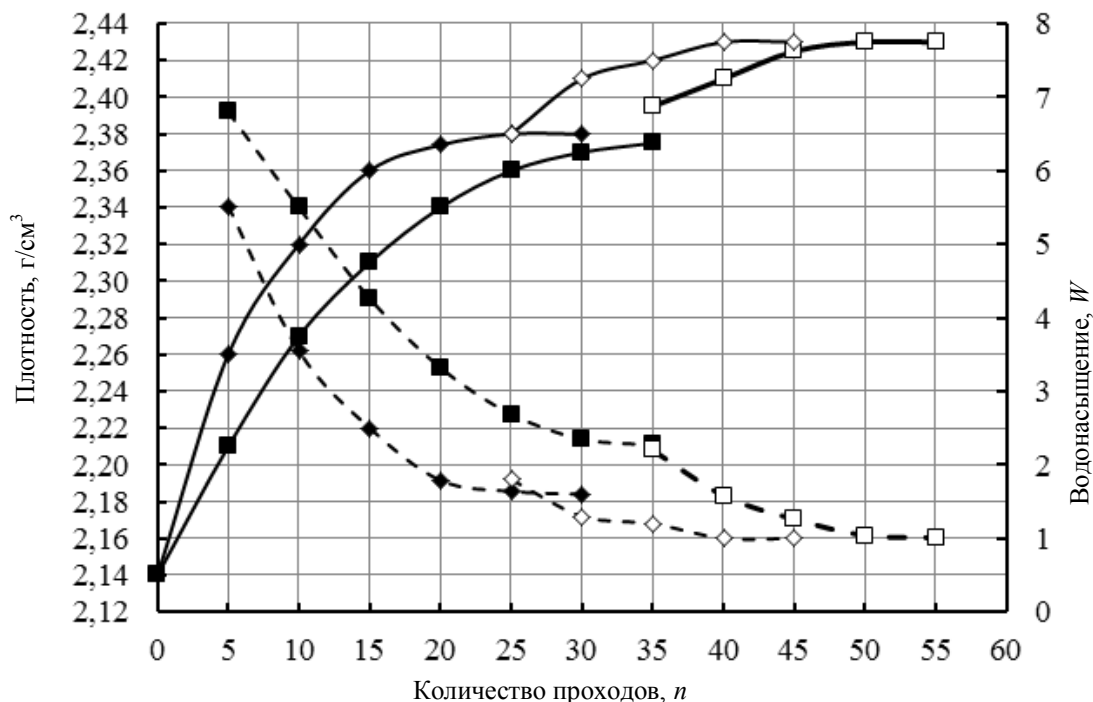


Рис. 4. Зависимость показателей средней плотности и водонасыщения асфальтобетона типа В от параметров уплотнения: скорость — \blacklozenge , \diamond — 0,35 км/ч; \blacksquare , \square — 1,75 км/ч; линейное давление — \blacksquare , \blacklozenge — 2,8 кг/см; \square , \diamond — 8,4 кг/см

Вторая составляющая (4) учитывает возрастание сопротивления от давления, обусловленное степенью каркасности смеси, учитываемой внутренним трением обволакуемых вяжущим зерен. Внутреннее трение, кроме каркасности (оно большое), зависит от вязкости пленок битума: чем толще пленка, тем меньше ее вязкость, тем меньше внутреннее трение. Таким же образом влияет и температура смеси. Когда она повышается, смазочный эффект пленки возрастает и сопротивление уплотнению уменьшается. Следовательно, повышенное содержания битума способствует одному и тому же уплотнению при меньшей затрате работы на уплотнение. Ограничительным фактором является волно- и колеобразование слоя при уплотнении. Улучшению уплотнения благоприятствуют все характеристики каменных материалов, способствующие снижению внутреннего трения. Это касается формы зерен: правильная (крайний случай — сферичность) или неправильная, угловатость, степень неровности поверхности, дисперсность. Внутреннее трение угловатых зерен щебня гораздо больше, чем тонкодисперсных составляющих — природного окатанного песка и минерального порошка.

Третья составляющая условия (4) — зацепление [6]. Оно близко по своей природе внутреннему трению. Оно практически не принимает участия в сопротивлении деформированию слоя в процессе эксплуатации под действием проходящего транспорта, поскольку в этом случае имеют место малые деформации. При уплотнении толщина уплотняемого слоя уменьшается от 15 % до 20 % (рис. 1). Это означает, что имеет место перемещение зерен разных размеров из одного положения равновесия (большого сопротивления перемещению) в другое (минимального сопротивления). При таком переходе частицы не только огибают одна другую, но могут скалывать грани или раскалывать менее прочные зерна (рис. 5). Это может резко увеличить сопротивление уплотнению. Следствием этого является нарушение гранулометрического состава смеси по сравнению с исходным. Оно присуще последней стадии уплотнения большими давлениями или тяжёлыми катками. Влияние зацепления на сопротивление уплотнению трудно учитывается косвенным показателем сцепления. Оно может быть учтено размерами формирующейся поверхности смещения зерен внутри уплотняемого слоя (рис. 5).

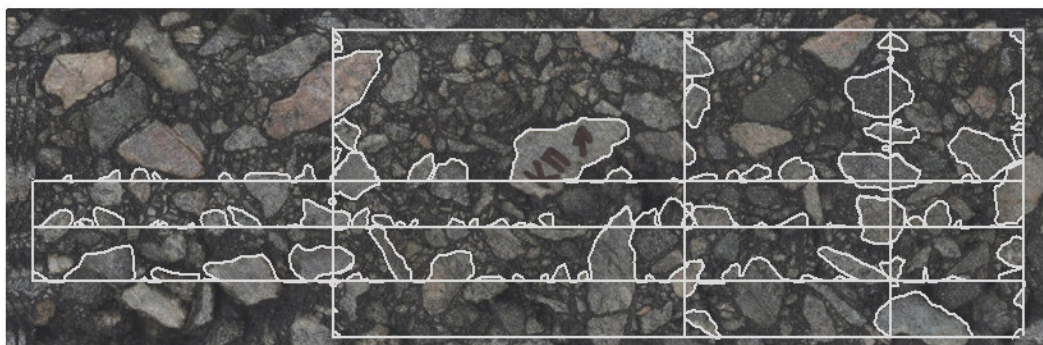


Рис. 5. Формирование огибающих поверхностей в направлении уплотняющего давления и перпендикулярно ему

Поскольку смещение зерен по наиболее слабым участкам, т.е. слою асфальтовяжущего или битума, всегда более энергетически выгодно, то поверхности скольжения формируются по слоям свободного и слабоструктурированного битума. Приведенные на рис. 4 огибающие поверхности намного больше, чем номинальная, определенная по геометрическим размерам объекта или образца (средняя длина горизонтальной огибающей – 333 мм относительно номинальной – 177 мм, вертикальной – 120 мм против 56 мм). Следовательно, прикладываемое к слою уплотняющим средством усилие должно быть достаточным для развития сдвига по фактически формирующейся поверхности. Как показывают измерения, выполненные путем сканирования среза образцов асфальтобетона по границе минеральных зерен крупнее 2,5 мм, в направлении давления огибающая поверхность больше номинальной для асфальтобетонов типов Г, В, Б, А и ЦМА соответственно в 1,90, 1,96, 2,34, 1,87 и 2,45 раза.

Коагуляционный тип контактов в асфальтобетоне обуславливает два взаимосвязанных реологических параметра: величину уплотняющего давления и время его действия. Теоретически уплотнение может быть обеспечено очень малым давлением, но за очень длительный промежуток времени и наоборот. Это возможно, если температура уплотняемого слоя будет постоянно высокой в течение всего периода уплотнения. Ни первое, ни второе условие не могут быть выполнены на практике. Со временем температура слоя снижается и давление необходимо повышать в соответствии с приростом прочности слоя из-за понижения температуры. По данным Я.И. Пырига при снижении температуры от 140 °С до 100 °С прочность асфальтобетона

типа Г на сдвиг снижается в 3,2 раза (от 0,022 МПа до 0,07 МПа), а прочность на растяжение по образующейся – в 4,5 раза (от 0,04 МПа до 0,18 МПа). Понижение температуры от 140 °С до 120 °С повышает прочность для тех же асфальтобетонов в 1,6 и 2,2 раза. Можно предположить, что давление катков должно следовать этой тенденции. Но даже при постоянстве температуры давление должно быть повышено, поскольку дальнейшее уплотнение без этого невозможно из-за упрочнения слоя.

В связи с этим процесс уплотнения осуществляется по многостадийной схеме. На практике используются 3 стадии (рис. 2). На первой стадии слой активно уплотняется при малых давлениях до момента, когда общее сопротивление слоя меньше $\sigma_{упл}$ (1). При выравнивании величин давления и сопротивления уплотнению деформирование слоя прекращается, хотя значение плотности далеко от требуемого. Прочность слоя при пониженных температурах существенно растёт.

Следовательно, давление должно быть повышено до уровня, превышающего сопротивление. Резкое увеличение давления невозможно, так как оно приведет к появлению трещин и волн укатки. Этот этап также завершается стабилизацией плотности и, если коэффициент плотности ниже 0,99 от проектной, то необходима и третья стадия уплотнения ещё более тяжелым катком, благодаря чему достигается запроектированная для принятого вида и типа асфальтобетонных смесей плотность.

Выводы

Асфальтобетонная смесь на стадии уплотнения является типичной грубодисперсной си-

стемой с контактами коагуляционного типа, что определяет характер ее деформирования под нагрузкой.

Коагуляционные контакты в смеси представлены в разной степени структурированными поверхностями тонкодисперсных частиц битумом. Степень структурирования определяется скоростью течения и сопротивлению течению битума в межзерновых пространствах под нагрузкой: падение сопротивления при повышении температуры, его рост и аномальное падение с увеличением скорости.

Упаковка минеральных зерен обеспечивается перемещением их друг относительно друга по коагуляционным слоям под действием нормальных сжимающих и касательных напряжений, возникающих при укатке. Коагуляционные слои играют роль смазки с непрерывно изменяющимися реологическими свойствами в зависимости от толщины слоя, температуры, давления, скорости.

Направленное регулирование или учет факторов, участвующих в процессе уплотнения, должно способствовать обеспечению нормируемой плотности асфальтобетона и, соответственно, повышению его долговечности в конструктивном слое.

Литература

1. Волков М.И. Дорожные строительные материалы / М.И. Волков, К.И. Штауб, В.О. Гельмер. – М.: Изд-во Наркомхоза РСФСР, 1939. – 584 с.
2. Горячие асфальтовые смеси, материалы, подбор составов смесей и строительство автомобильных дорог в северной Америке. Передовой зарубежный опыт. Национальный центр по асфальтовой технологии (NAPA). – 3-е изд. – М.: Росавтодор, 2009. – 411 с.
3. Волков М.И. К вопросу о физико-химических основах технологии асфальтового бетона / М. И. Волков, В.М. Смирнов // Труды Харьковского автомобильно-дорожного института. – 1961. – Вып. 26. – С. 3–9.
4. Золотарев В.А. Укатка асфальтобетонных смесей в лабораторных условиях / В.А. Золотарев, В.П. Корюк // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 1. – С. 34–36.
5. Eckman N.B. Caracterisation des enrobes a froid visa vis de la mise en oeuvre de la monte en cohesion / N.B. Eckman, S. Le Bec, D. Lesueur // Revue Generale des routes et des aerodromes (RGRA). – 2002. – № 802. – P. 52–59.
6. Иванов Н.Н. Дальнейшее исследование устойчивости и сопротивление износу усовершенствованных и переходных покрытий и прочности оснований / Н.Н. Иванов // Труды МАДИ. – 1958. – Вып. 22. – С. 5–13.

Рецензент: С.Н. Толмачев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
