

# УПЛОТНЕНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ГИРАТОРЕ

Важной особенностью в определении физико-механических характеристик асфальтобетона является выбор метода изготовления образцов из асфальтобетонной смеси. Согласно старой методике ГОСТ 12801, стандартные образцы изготавливаются путем приложения к ним постоянной нагрузки — 40 МПа в течение 3 минут, в случае содержания щебня более 50% образцы предварительно подвергают вибронагрузке и далее доуплотняют на прессе под нагрузкой в 20 МПа. Данный способ имеет ряд существенных недостатков.

Д.А. Колесник, руководитель группы исследования строительных материалов, АО «ВАД»;

Д.В. Пахаренко, главный технолог, АО «ВАД»



**П**од действием постоянной нагрузки не происходит перераспределения частиц смеси, что приводит к частичному раздавливанию щебня. Метод не отражает и не моделирует уплотнение, которое происходит на дороге в процессе укатки катками. В результате мы получаем асфальтобетоны с разными структурами, которые формируются за счет различной ориентации и частичной раздробленности зерен минерального материала. В зарубежной литературе [1,2] проводились оценка и сравнение различных методов получения образцов, в результате было определено, что вальцовый уплотнитель (компактор) и гиратор — или, как принято его называть у нас, вращательный уплотнитель — наиболее точно имитируют процесс уплотнения, поскольку под действием относительно небольшой нагрузки происходят значительные сдвиговые деформации, которые позволяют достигать равномерного распределения, перемещения компонентов смеси и переориентации частиц. Другие методы уплотнения (Маршалл, Пресс), создают только прямую нагрузку, что приводит к неравномерному распределению компонентов смеси, выдавливанию вяжущего с поверхности каменных материалов, снижению толщины битумной пленки и, как следствие, значительному повышению жесткости смеси.

Более подробно вопрос выбора и оптимизации способа изготовления лабораторных образцов изучался в [3,4] при разработке системы «Суперпейв». В результате при

подборе состава асфальтобетонных смесей для проведения исследовательских работ и рутинного, ежедневного контроля качества выпускаемой асфальтобетонной смеси используется гиратор.

Принцип изготовления образцов на гираторе следующий (рисунок 1): горячая асфальтобетонная смесь взвешивается и засыпается в предварительно подогретую специальную стальную форму, накрывается вкладышем и устанавливается в гиратор. Далее выполняется уплотнение путем вращения относительно вертикальной оси заложенной формы под постоянным углом наклона (в России и в США угол 1,16°, в Европе 0,82°) и с приложением вертикального давления 600 кПа, что примерно соответствует давлению колеса автомобиля на покрытие. Смесь подвергается сдвиговым деформациям, а уплотнение происходит без разрушения, дробления, изменения зернового состава, в отличие от процесса изготовления образцов при постоянном давлении на прессе и уплотнителе Маршалла. Уплотнение происходит в автоматическом режиме, в процессе работы гиратора, на мониторе компьютера в виде числовых значений и графиков отображаются количество оборотов, высота, плотность, остаточная пористость образца, рассчитанная по геометрическим размерам и массе навески. На сегодняшний день гиратор применяют для изготовления образцов, оценки объемно-весовых и физико-механических характеристик асфальтобетона в России, Китае, США, Канаде, странах Европы, Австралии и др.

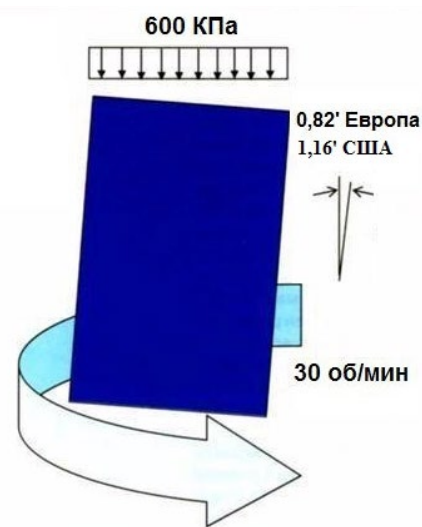


Рисунок 1. Схема работы гиратора-компактора

В системе «Объемно-функционального проектирования» в России и в системе «Суперпейв» в США с использованием гиратора осуществляются проектирование и подбор состава асфальтобетонной смеси. Согласно данному подходу, смесь оптимального зернового состава должна содержать 4% воздушных пустот после заданного, проектного (Ndesign) числа оборотов гиратора. Проектное число оборотов гиратора задается в зависимости от интенсивности движения (таблицы 1,2). Фактически подразумевается, что плотность образца после Ndesign проектного числа оборотов гиратора будет соответствовать плотности асфальтобетона в покрытии через 2 года эксплуатации. Более подробно о методе подбора «Суперпейв» и параметрах уплотнения с использованием гиратора можно узнать из статьи Радовского Б. С. [5] и в публикации [6].

Таблица 1. Требования к параметрам уплотнения в зависимости от интенсивности и условий движения по системе «Суперпейв» в США (2007 г.) [3,5,6]

Интенсивность движения ESALs <sup>1</sup> миллионы	Параметры уплотнения, число оборотов гиратора			Характеристика типичных условий движения
	Ninitial	Ndesign	Nmax	
< 0,3	6	50	75	Легковое движение. Местные дороги и городские улицы, на которых проезд грузовых автомобилей запрещен
0,3-03	7	75	115	Среднее движение на коллекторных дорогах и большинстве дорог графств
3-30	8	100	160	Интенсивность от средней до высокой. Городские улицы, дороги штатного значения, некоторые дороги федерального значения
>30	9	125	205	Высокая интенсивность. Большая часть междустатных дорог, полосы замедленного грузового движения на подъеме

Примечание: ESALs (Equivalent Single Axle Loads) — суммарное приведенное к расчетной нагрузке число проездов осей с нагрузкой 80 кН

Таблица 2. Требования к числу оборотов вращательного уплотнителя в зависимости от условий движения по системе «Объемно-функционального проектирования» в России [ГОСТ Р 58401.3-2019]

Условия движения по количеству приложений АК-11,5	Число оборотов вращательного уплотнителя			Категория, класс автомобильной дороги
	Nнач	Nпр	Nмакс	
Н (0,5-1,8)	7	75	115	Дороги обычного типа, категории V с минимальной интенсивностью движения
Т (1,8-5,6)	8	100	160	Дороги обычного типа, категории III и IV со средней интенсивностью движения
Э (>5,6)	8	100	160	Дороги обычного типа, категории IB II и III с высокой интенсивностью движения
>30	9	125	205	Скоростные дороги и автомагистрали категории IA и IB

Примечание: в настоящей таблице применены следующие обозначения: Л — легкие условия движения (до 0,5 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя дорожной одежды); Н — нормальные условия движения (от 0,5 до 1,8 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя дорожной одежды); Т — тяжелые условия движения (от 1,8 до 5,6 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя дорожной одежды); Э — экстремально тяжелые условия движения (более 5,6 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя дорожной одежды); Nнач — начальное число оборотов вращательного уплотнителя; Nпр — проектное число оборотов вращательного уплотнителя; Nмакс — максимальное число оборотов вращательного уплотнителя.

Из таблиц 1 и 2 видно, что чем выше интенсивность движения, тем больше требуемое число оборотов гиратора (вращательного уплотнителя). Такие данные были получены в результате обширной многолетней исследовательской программы, проводимой в США с начала 1990-х годов. В одном из таких отчетов [7] описывается взаимосвязь между колеобразованием в покрытии и количеством оборотов гиратора, объемно-весовыми характеристиками образцов, получаемых при уплотнении асфальтобетонной смеси. Одним из первых успешных предложений по оценке устойчивости асфальтобетонной смеси к колеобразованию через количество оборотов гиратора был коэффициент наклона кривой уплотнения (формула 1) — коэффициент уплотняемости.

$$K = \frac{\rho_{des} - \rho_{ini}}{\log N_{des} - \log N_{ini}} \times 100\% \quad (1)$$

где K — коэффициент уплотняемости;

$\rho_{des}$  — плотность образца при количестве оборотов

$N_{design}$  на проектном уровне;

$\rho_{ini}$  — плотность образца при количестве оборотов  $N_{initial}$  на начальном уровне;

$N_{des}$ ,  $N_{ini}$  — число оборотов гиратора на проектном и начальном уровнях (см. таблицу 1).

Согласно данным, приведенным в [7], между коэффициентом уплотняемости и характеристиками асфальтобетона, в том числе модулем жесткости, ползучестью (склонностью к колеобразованию), существуют взаимосвязь. Чем ниже коэффициент, тем больше смесь склонна к уплотняемости, тем быстрее смесь уплотнится под катками и, позже, будет деформироваться под движением автомобильного транспорта.

Так, смеси с меньшим содержанием щебня (замельченные) имеют меньший коэффициент уплотняемости. На рисунке 2 приведены кривые зернового состава асфальтобетонной смеси 19 мм на основе гранитного материала с различным содержанием щебня. Смеси, содержащие большее количество

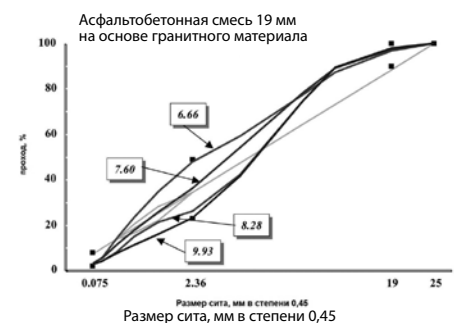


Рисунок 2. Воздействие зернового состава на коэффициент уплотняемости [7]

природного песка/гравия, также обладают меньшим коэффициентом уплотняемости.

На рисунке 3 приведен график зависимости коэффициента уплотняемости модуля сдвига  $G^*$  при температуре 40 °С и сдвиговой деформации  $\gamma_{perm}$  при циклическом нагружении. Из графика видно, что при увеличении коэффициента уплотняемости также возрастает модуль сдвига асфальтобетона и снижается деформация (увеличивается стойкость к колеобразованию). Подобные зависимости были получены в разных проектах, но они не давали достаточной

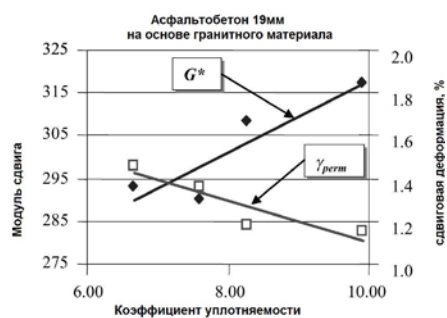


Рисунок 3. График зависимости модуля сдвига и сдвиговой деформации от коэффициента уплотняемости [7]

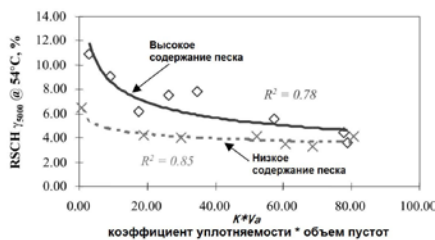


Рисунок 4. Взаимосвязь коэффициента уплотняемости, объема пустот и деформацией сдвига при циклическом нагружении (проект NCHRP 9-7)



Рисунок 5. Гиратор-компактор (вращательный уплотнитель)

точности, хорошей корреляции, но самое главное — не учитывалось количество вовлеченного вяжущего в асфальтобетонную смесь. В результате для прогнозирования свойств асфальтобетона и его поведения было рассмотрено и предложено множество различных параметров, рассчитываемых по количеству оборотов при уплотнении с использованием гиратора и по объемно-весовым характеристикам асфальтобетона (плотность, содержание пустот), но наиболее точным оказалось выражение (формула 2) — коэффициент уплотняемости, учитывающий количество воздушных пустот (остаточную пористость) в уплотненном образце.

$$K \times V_a, (2)$$

где  $K$  — коэффициент уплотняемости смеси по формуле (1);  $V_a$  — объем пустот (содержание воздушных пустот, %) в уплотненном асфальтобетонном образце при  $N_{des}$

На рисунке 4 представлены зависимости сдвиговой деформации при испытании циклическим нагружением от коэффициента уплотняемости и объема пустот. При этом смеси были разделены на два вида — с низким и высоким содержанием природного песка, поскольку наличие большого количества природного песка в смеси в значительной степени увеличивает склонность к колеобразованию. В целом наблюдается следующая тенденция — чем выше значение коэффициента уплотняемости, умноженного на объем пустот асфальтобетона, тем более устойчив будет этот асфальтобетон к пластическим деформациям, колеобразованию в покрытии автомобильной дороги. При этом немаловажной

остается проблема учета вязкости вяжущего, которое применяется для изготовления образцов, поскольку, как показали эксперименты и литературный обзор [4,7], гиратор нечувствителен к изменению вязкости битума. Фактически, при уплотнении смесей одного и того же состава, но с применением битумов разных марок (в том числе ПБВ на основе СБС), мы получим аналогичные результаты по объемно-весовым характеристикам при одинаковой затраченной работе на уплотнение. Другими словами, смесь уплотнится до одной и той же плотности за одинаковое число оборотов.

Проанализировав результаты зарубежных исследований, можно сделать вывод, что гиратор уже на стадии проектирования позволяет оценивать склонность смеси к колеобразованию (накоплению пластических деформаций). При этом прибор имеет значительную чувствительность к структуре минерального остова, в то же время необходимо помнить, что не учитывается вязкость применяемого битума, и в дальнейшем (например, для ранжирования смеси в зависимости от применяемого вяжущего) необходимо провести испытания на устойчивость к колеобразованию. Система «Объемно-функционального проектирования» предусматривает проведение испытания на колеустойчивость асфальтобетона при проектировании состава и выпуске асфальтобетонной смеси на АБЗ.

В 2011 г. был проведен ряд экспериментов с использованием гиратора (рисунок 5) для анализа выпускаемых асфальтобетонных смесей (соответствующих ГОСТ 9128) применительно к информации, полученной из зарубежных источников [1–7]

и приведенной выше. В первую очередь было проведено сравнение способов изготовления асфальтобетонных образцов в лабораторных условиях с фактическими данными, получаемыми при уплотнении катками на дороге путем определения модуля жесткости при непрямом растяжении по методике EN12697–26 метод С. Данные эксперимента приведены в таблице 3. Для сравнения использовалась одна смесь мелкозернистая плотная тип А с различными битумными вяжущими, которая отбиралась на дороге и доставлялась в лабораторию для изготовления асфальтобетонных образцов различными способами, впоследствии на дороге (в месте отбора смеси) выпиливались керны для проведения испытаний.

Как видно из результатов, приведенных в таблице 3, наиболее точно имитирует процесс уплотнения на дороге вальцовый уплотнитель, но использование его повсеместно связано с определенными трудностями — высокие энерго- и трудозатраты, большое количество асфальтобетонной смеси для изготовления одного образца, необходимость выпиливания кернов из асфальтобетонной плиты для дальнейших испытаний и т.д. Образцы, полученные на гираторе, имеют жесткость в 1,5–1,7 раза выше по сравнению с кернами, выпиленными на дороге, данный факт объясняется не только различием в способе уплотнения, но и старением вяжущего, которое происходило в процессе догрева смеси в лаборатории до требуемой температуры уплотнения после транспортировки с дороги. Несмотря на одинаковую плотность и водонасыщение, образцы, заформованные на прессе, имеют значительное отличие от образцов, выпиленных

из покрытия, в 2.1–2.3 раза; данный факт объясняется особенностью уплотнения на прессе — сжатие под высоким давлением, получение более тонких пленок битума на каменном материале, выдавливание вяжущего в образцах асфальтобетона — и, как описывалось ранее, данный метод имеет ряд существенных недостатков.

На следующем этапе провели сравнение уплотняемости асфальтобетонных смесей с различным зерновым составом. В эксперименте уплотнение проводилось при одинаковой температуре, смеси изготавливались на одном и том же битумном вяжущем, все смеси соответствовали требованиям ГОСТ 9128.

Как видно из данных, приведенных в таблице 4, наибольшую склонность к уплотнению показала смесь тип Б, которая всего за 35 оборотов гиратора достигла требуемой плотности, смесь типа А № 3 с высоким содержанием частиц размером мельче 0,63 мм также можно отнести к легкоуплотняемым. Рассчитав показатель  $K \times Va$  по формуле 2 (графа 8 таблицы 3), мы получаем, что его значение достаточно низкое и, следовательно, на дороге при интенсивном движении такой асфальтобетон будет склонен к колееобразованию за счет накопления пластических деформаций. Смесь типа А № 1, выпускаемая по утвержденному рецепту с за- вода, и экспериментальная смесь

типа А № 2, приготовленная в лаборатории, с минимальным в пределах ГОСТ 9128 содержанием частиц размером мельче 0,63 мм показали высокую устойчивость к уплотняемости (уплотнению), что свидетельствует о наличии жесткой каркасной каменной структуры в материале. Значение показателя  $K \times Va$  (графа 8 таблицы 3) намного выше в сравнении с двумя предыдущими примерами. На уплотнение таких асфальтобетонных смесей потребуется затратить большее количество энергоресурсов, но в то же время данные асфальтобетоны будут более устойчивым к колееобразованию. На рисунке 6 показан график зависимости остаточной пористости

Таблица 3. Сравнение способов изготовления образцов асфальтобетонной смеси с фактическими результатами, получаемыми при уплотнении на дороге

Наименование смеси	Оборудование/Способ получения	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение, %	Модуль жесткости при 20°C и деформации 5мкр, МПа	Соотношение с модулем жесткости на дороге, %
м/з плотный Тип А на основе ПБВ 60	Уплотнение на дороге	2,67	2,4	890	100
	Вальцовый уплотнитель	2,66	2,8	1170	131
	Гиратор, образцы диаметром 100мм	2,67	2,5	1485	167
	Гиратор, образцы диаметром 150мм (из образца выпиливался керн d=100мм)	2,67	2,1	1440	162
м/з плотный Тип А на основе битума БДУ 70/100	Пресс + Вибростол ГОСТ 12801	2,67	2,3	2115	238
	Уплотнение на дороге	2,66	2,6	1970	100
	Гиратор, образцы диаметром 100мм	2,66	2,4	3040	154
	Пресс + Вибростол ГОСТ 12801	2,67	2,3	4320	219
м/з плотный Тип А на основе битума БНД 60/90 + модификатор	Уплотнение на дороге	2,67	2,1	2215	100
	Гиратор, образцы диаметром 100мм	2,66	2,4	3430	155
	Пресс + Вибростол ГОСТ 12801	2,65	2,8	4680	211

Таблица 4. Сравнение уплотняемости различных смесей

№	Наименование показателя	Наименование смеси			
		м/з Тип А № 1 с содерж. щебня 56% и частиц <0,63мм — 17% <0,071мм — 8%	м/з Тип А № 2 с содерж. щебня 60% и частиц <0,63мм — 15% <0,071мм — 6%	м/з Тип А № 3 с содерж. щебня 60% и частиц <0,63мм — 20% <0,071мм — 10%	м/з плотный Тип Б
Метод уплотнения: по ГОСТ 12801-98 (вибростол +20МПа)					
1	Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,63	2,63	2,66	2,66
2	Водонасыщение, %	3,5	3,5	2,0	1,8
Метод уплотнения: Гираторный, до требуемой плотности					
3	Количество оборотов гиратора	90	120	50	35
4	Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,63	2,64	2,67	2,67
5	Водонасыщение, %	3,0	3,0	1,5	1,4
Метод уплотнения: Гираторный, по числу оборотов 120					
6	Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,64	2,64	2,71	2,72
7	Водонасыщение, %	2,3	3,0	0,6	0,4
8	$K \times Va$	108,8	115,7	34,5	16,5
Метод уплотнения: Гираторный, по числу оборотов 200					
9	Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,68	2,665	2,73	2,74
10	Водонасыщение, %	1,5	2,0	0,1	0,2

(содержания воздушных пустот) от числа оборотов гиратора для смесей, приведенных в таблице 3, на котором четко видно резкое снижение количества пор в процессе уплотнения у асфальтобетона типа Б и асфальтобетона типа А № 3 с высоким содержанием частиц размером мельче 0,63 мм. Согласно подходу системы «Суперпейв» и спецификациям США (таблица 1), в асфальтобетонных образцах из смеси с оптимальным гранулометрическим составом и количеством битума должно содержаться 4% пустот (остаточная пористость 4% или требуемая плотность 96% от максимальной плотности) при количестве оборотов гиратора Ndesign. Как видно из графика на рисунке 6, асфальтобетонная смесь тип Б достигла требуемой остаточной пористости 4% всего за 44 оборота гиратора, смесь типа А № 3 за 58 оборотов — это свидетельствует о легкоуплотняемости (пластичности) данных смесей. Сейчас требование в 4% по содержанию воздушных пустот в образцах присутствует и в системе «Объемно-функционального проектирования» в ГОСТ Р 58401.1 (2). Метод изготовления образцов по Маршаллу, который применяется для проектирования асфальтобетонной смеси по ГОСТ Р 58406.1(2), очень похож на старую методику формовки на прессе по ГОСТ 12801 и имеет те же недостатки, описанные выше. Приготовление образцов на вращательном уплотнителе является более перспективным способом. Поскольку нас интересуют конечные свойства асфальтобетона, то считаем, что следует провести исследовательскую работу и внести дополнение в стандарт ГОСТ Р 58406.1(2), предусмотрев возможность проектировать и изготавливать асфальтобетонные образцы на гираторе (вращательном уплотнителе). Провести работу по сравнению асфальтобетонов, запроектированных на 50 ударов молотка Маршалла и асфальтобетонов, полученных на гираторе, с аналогичными свойствами с определением числа оборотов вращательного уплотнителя, равного 50 ударам, что несомненно принесет больше пользы и позволит использовать один прибор для работы по всем новым стандартам на асфальтобетон. Таким образом, в сравнении

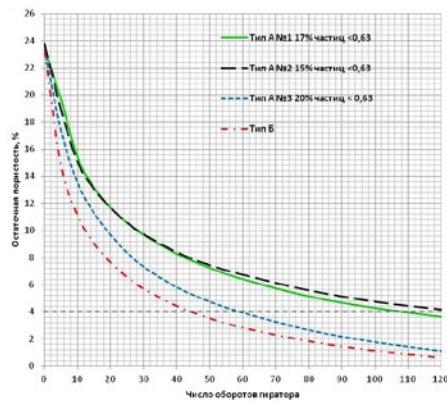


Рисунок 6. График зависимости остаточной пористости от числа оборотов гиратора

с методом изготовления асфальтобетонных образцов в лабораторных условиях по ГОСТ 12801 и ГОСТ Р 58406.9, использование гиратора дает ряд существенных преимуществ и положительных особенностей, а именно:

- ◆ имитируется уплотняющее воздействие колеса (давление 0,6 МПа);
- ◆ существует возможность формовать образцы до требуемой заданной плотности или числа оборотов;
- ◆ оценивается уплотняемость асфальтобетонной смеси;
- ◆ определяются технологические свойства смеси (уплотняемость);
- ◆ не разрушаются минеральные материалы в процессе уплотнения, при этом перераспределяются компоненты смеси и получается однородная структура;
- ◆ позволяет изготавливать образцы диаметром 100 и 150 мм различной высоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Hartman, 1 M. D. Gilchrist and G. Walsh Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue. Journal Of Transportation Engineering / September/October 2001 p. 370–378.
2. Masahiko Iwama — Influence of Specimen Size and Orientation on the Mechanical Properties of Laboratory Compacted Asphalt Specimens. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Master of Philosophy — July 2009.
3. NCHRP Report 573 // Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign. Table Brian D. Prowell, E. Ray Brown. National Center For Asphalt Technology 2007.
4. NCHRP Web Document 34 (Project D9–9[1]): Contractor’s Final Report. Literature Review: Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign Table.
5. Радовский Б.С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу Суперпейв // Дорожная техника. Каталог-справочник 2007. с. 86–99.
6. Горячие асфальтовые смеси, материалы, подбор составов смесей и строительство автомобильных дорог в Северной Америке. Передовой зарубежный опыт. Национальный центр по асфальтовой технологии (NAPA), третье издание, «Росавтодор», 2009–411 с.
7. Anderson, R.M., Turner, P.A., Peterson, R.L., Mallick, R.B. NCHRP Report 478 — Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior. Washington, DC. 2002.



Рисунок 7. Вращательный уплотнитель отечественного производства

В результате уже на этапе проектирования и/или выпуска асфальтобетонной смеси мы можем оценить ее склонность к накоплению пластических деформаций (склонность к колееобразованию) при эксплуатации. Проектирование и изготовление асфальтобетона на вращательном уплотнителе (гираторе) является перспективным методом, который можно широко применять в РФ, тем более уже серийно выпускаются отечественные машины (рисунок 7). ■