



Костельов М. П.,
канд. техн. наук,
главный технолог ЗАО «ВАД»
(г. Санкт-Петербург)

«УМНЫЕ» ВИБРОКАТКИ ДЛЯ ДОРОЖНИКОВ!?

(ОБЗОР С ОЦЕНКОЙ НОВИНОК ПОСЛЕДНЕГО ВРЕМЕНИ)

Не так уж далекие времена в России, когда важность и значимость операции уплотнения дорожно-строительных материалов понимал и по достоинству оценивал всего лишь узкий круг дорожных ученых и специалистов-практиков. Большинство же дорожников относилось к ней как дешевой (особо много не зарабатываешь на 2–3% от сметной стоимости строительства дороги в целом) и по большей части вспомогательной операции.

Сегодня уже большинство причастных к сооружению дорожных объектов пришло к осознанию того, что уплотнение является если не основной или главной, то по крайней мере ключевой технологической операцией по своей значимости и влиянию на эффективность вкладываемых средств, на качество, надежность и долго-

вечность всего дорожного сооружения.

Теперь никого из россиян не удивляет многочисленность (более двух десятков) фирм-производителей уплотняющей техники и широкое многообразие выпускаемых ими различного рода, типа и размера катков, трамбовок и виброплит. Причем многие из этих фирм, особенно те из них, кого можно причислить к законодателям высокотехнологических разработок (Bomag, Caterpillar, Dynapac, Hamm, Ingersoll-Rand и др.) и к основным поставщикам уплотняющей техники на мировой рынок, непрерывно совершенствуют свою продукцию, обновляя ежегодно до 30–40% выпускаемых моделей машин и установок.

Некоторые из таких усовершенствований порой носят косметический характер, другие улучшают условия пре-

бывания и работы машиниста в кабине катка, третьи облегчают и упрощают сам рабочий процесс уплотнения (например, прозрачная часть пола в кабине для наблюдения за поверхностью вальца во время укатки горячего асфальтобетона; подсветка боковых кромок вальца при работе катка вдоль бордюра или подпорных стенок в темное время суток; поворотные и поднимающиеся выше кабины для улучшения обзорности машиниста и т.д., и т.п.).

Однако периодически появляются и более серьезные новинки функционально-технологического характера, направленные на повышение качества и производительности операции уплотнения тех или иных материалов. Такие разработки заслуживают не только особого внимания дорожников, но и всестороннего анализа и оценки их полезности, эффективности и возможности использования в российских условиях.

Автору довелось побывать на двух последних крупнейших мировых выставках строительных и дорожных машин и оборудования в немецком Мюнхене (2004 г.) и американском Лас-Вегасе (2005 г.) и познакомиться с рядом «умных», интересных и полезных новых разработок, предназначенных для уплотнения грунтов, щебеночных материалов и асфальтобетонных смесей.

Как и положено при строительстве автомобильной дороги, логично начать с новинок для уплотнения грунтов земляного полотна. Фирма Bomag (Германия) создала для этих целей оригинальный крупный виброкаток BW225 D-3 BVC (Bomag VarioControl)



с многогранной поверхностью вальца (рис. 1; 2). Последний имеет три, очевидно, сваренных в единый широкий валец восьмисегментных или восьмигранных кольца, которые смещены (повернуты) относительно друг друга на половину длины одного сегмента. В результате на вальце катка находится 24 ровных (плоских) площадки с гранями. При качении такого вальца статические и динамические воздействия на грунт передаются площадками и гранями [1].

В мировой дорожной практике уже были подобные сегментные статические катки, на гладкой поверхности вальцов которых шарнирно крепились отдельные плоские площадки (сегменты), передававшие силу веса катка уплотняемому грунту. Таким способом пытались увеличить незначительную толщину слоя, уплотняемого гладковальцовым катком, и снизить чрезмерную сдвиговую волну на поверхности укатки. Как известно, по этим причинам гладковальцовые статические катки практически не используются на уплотнении грунтов земляного полотна.

В связи с новинкой фирмы **Voitag** полезно вспомнить и давнишний трамбующий каток с квадратным вальцом из Южной Африки (рис. 3), который при перекачивании с грани на грань опрокидывался на большую плоскую площадку, производя всей своей массой ударное нагружение грунта с хорошим результатом уплотнения.

Производственное использование одновальцового грунтового виброкатка BW225 D-3 BVC с многогранной или сегментной формой поверхности вальца осуществлялось на трех объектах в Германии при возведении насыпей из различных типов и состояний грунтов, включая связные глинистые и скально-подобные мергелисто-сланцевые — на подъездной железной дороге к аэропорту, автомобильной дороге A38 и крупной промышленной площадке (объем грунта 450 тыс. м³).

В частности, на строительстве автомобильной дороги, для которой требовался к ка-



Рис. 1. Виброкаток BW225 B-3 BVC фирмы **Voitag** для эффективного уплотнения связных и других разновидностей грунтов.

честву уплотнения грунтов наиболее жесткие в Германии (степень уплотнения по Проктору не ниже 97%, а несущая способность земляного полотна при штамповых динамических испытаниях не менее 45 МН/м²), были получены удивительные результаты. На связном глинистом грунте степень уплотнения 98,2% была зафиксирована на глубине около 1,0 м. Причем для этого потребовалось всего 4–5 проходов этого катка с новой формой вальца.

Разработчики новинки объясняют достигнутый эффективный или даже эффектный результат, которого никто в мире еще не получал при использовании катков на глинистых грунтах, различием в контактной передаче динамических давлений вальца такого катка уплотняемому грунту. При большей площади контакта плоского сегмента этого вальца с поверхностью укатки «луковица» (термин из механики грунтов) давлений в грунте заметно больше, чем под цилиндрическим вальцом (рис. 4).

Действительно, в механике грунтов есть такое понятие как «глубина активной зоны» h_a , в которой реализуется до 85% появившейся на поверхности грунтового основания деформации или осад-

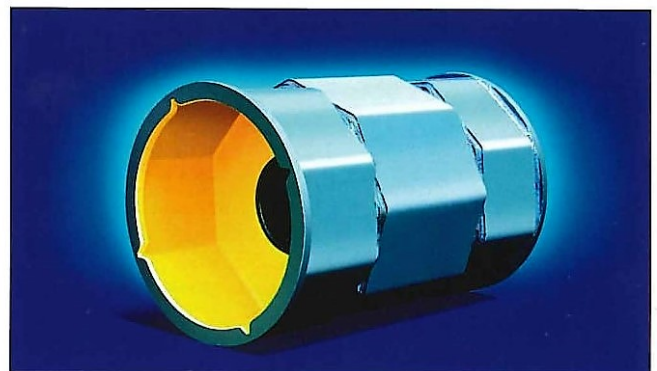


Рис. 2. Сегментный валец нового виброкатка BW225 D-3 BVC фирмы **Voitag**.

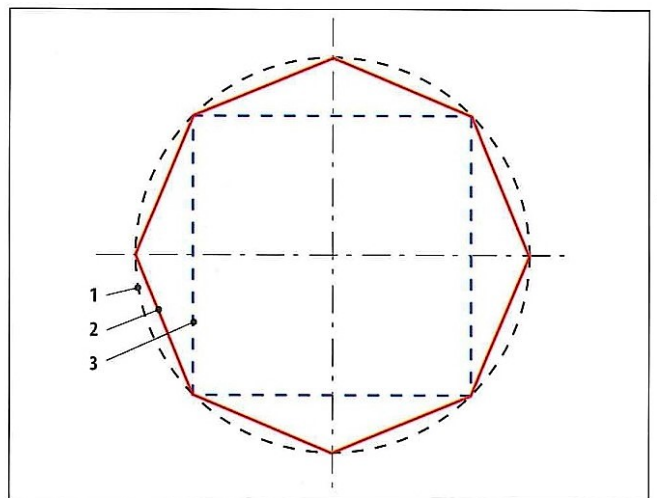


Рис. 3. Формы рабочей поверхности вальцов грунтоуплотняющих катков: 1 — обычная цилиндрическая; 2 — восьмисегментная или восьмигранная (фирма **Voitag**); 3 — квадратная (Южная Африка).

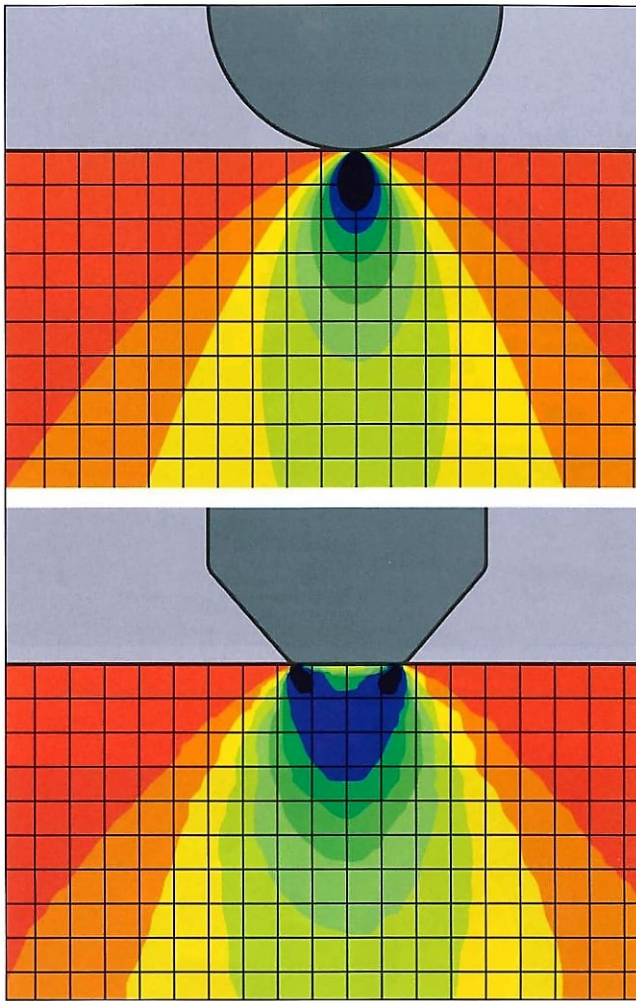


Рис. 4. «Луковица» давлений в грунте под цилиндрическим и сегментным вальцами.

ки, а остальные примерно 15% приходятся на слои грунта, расположенные ниже глубины этой активной зоны вплоть до $(3,5-4,0) d_{ш}$ или b_o , где $d_{ш}$ (или b_o) — диаметр (или меньшая сторона) подошвы штампа или рабочего органа уплотняющей машины (основание виброплиты или вибротрамбовки, шина, валец гладкий, кулачковый, решетчатый, сегментный, ребристый, подошва трамбуемой плиты).

В теории и технологии уплотнения различных дорожно-строительных материалов практическим путем получены универсальные результаты и зависимости, отраженные на графике рис. 5. Из него следует, что предельная толщина грунта или иного материала, прорабатываемого до требуемой степени уплотнения, или предельная глубина активной зоны h_a зави-

сит в основном от трех факторов — характера нагрузки (статическая, вибрационная или, точнее, виброударная, чисто ударная), размера контактной площадки ($d_{ш}$ или b_o), передающей усилия уплотнения грунту, и, наконец, от соотношения контактных давлений рабочего органа уплотняющей машины или устройства и предела прочности на сжатие уплотняемого грунта.

Правда, есть еще четвертый фактор влияния — количество циклов нагружения уплотняющей нагрузкой. Как правило, практически полная реализация потенциальных возможностей катка повышать плотность материала происходит примерно за 8–10 проходов при условии, что его давления будут близки прочностным показателям материала. При снижении контактных давлений катка количество требуемых его проходов прогрессивно возрастает с одновременным снижением глубины проработки, т.е. нехватку силовых воздействий можно лишь частично компенсировать количеством проходов или циклов нагружения. А это не всегда технологически доступно и экономически выгодно, как например, при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей.

Из приведенного графика следует, что даже при большой контактной площадке с малым контактным давлением можно получить незначительную глубину требуемого уплотнения. И наоборот, тот же не очень удовлетворительный результат будет при малой контактной площадке и высоком давлении. И уж совсем плохим он окажется при малой контактной площадке и низком давлении, так как в этом случае сработает известный эффект вытоптанной пешеходами дорожки на лужайке парка или на городском газоне.

Разработчики виброкатка BW225 D-3 BVC с сегментной поверхностью вальца, видимо, вольно или невольно использовали научные наработки для решения актуальной практической задачи и нашли удачное сочетание размера подошвы сегмента (очевидно около 600–700 мм) и высоких контактных динамических давлений вальца, воплотив старую идею в новое исполнение.

При весе вибровальцового модуля этого катка 17,6 т и центробежной силе 40,2 тс максимальные контактные его давления на грунт должны ориентировочно составить около 9–10 (грунт рыхлый) и 15–16 кгс/см² (плотный), что вполне приемлемо для высококачественно-

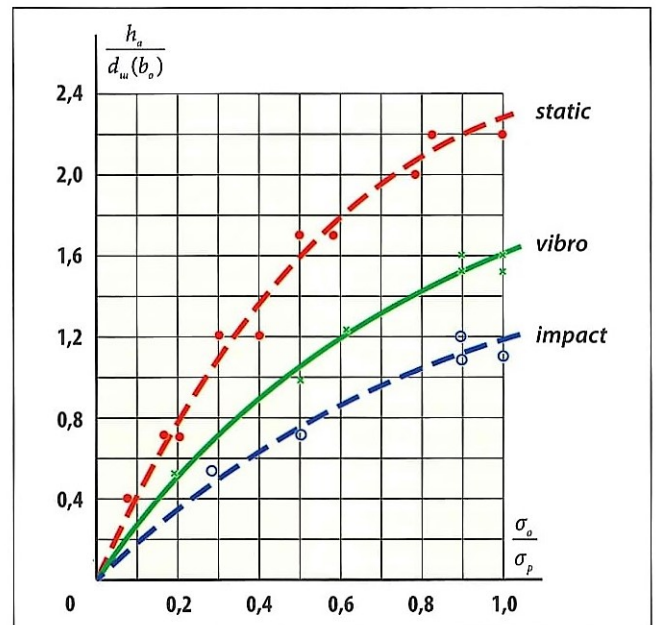


Рис. 5. Зависимость глубины активной зоны h_a в относительных единицах (толщина уплотняемого слоя) от контактных давлений в относительных единицах и характера уплотняющих нагрузок.



Крупная модель катка фирмы Bomag — BW226.

го уплотнения связного грунта и на достаточно солидную глубину.

Вообще же все до сих пор известные типы и разновидности дорожных грунтовых катков, при создании которых решались отдельные или комплексные задачи по повышению качества и толщины слоя уплотнения за счет увеличения силового давления и размеров контактной площадки с одновременным снижением сдвиговых смещений (волн) при поверхностной зоне укатки, наиболее характерных для тяжелых катков с гладкими вальцами, можно выстроить в один логический ряд с учетом последовательности их появления:

- гладковальцовый статический;
- кулачковый (sheep foot) статический
- кулачковый (pad foot) статический, в том числе фирм Caterpillar, Bomag и Дупарас, с трамбующим эффектом (за счет скоростной укатки);
- сегментный статический;
- решетчатый статический;
- ребристый статический;
- гладковальцовый вибрационный (точнее, вибро- или частотударный);
- кулачковый (pad foot) вибрационный;
- сегментный или многогранный (многоплощадочный) вибрационный фирмы Bomag;

- трамбующий с квадратным вальцом (Южная Африка).

Не исключено появление в этом ряду в соответствии упомянутыми принципами и логикой и других новых разработок. Тем более, что большинство фирм находится в постоянном поиске, стремясь придать своим грунтоуплотняющим каткам больше технологической универсальности, повысить качественную сторону их работы путем более широкого регулирования уплотняющих воздействий, в том числе в автоматическом режиме, оснастить специальными устройствами и даже системами контроля качества уплотнения грунта.

Такие поиски приводят к некоторой модернизации существующих моделей грунтовых виброкатков, сводящейся к незначительному изменению их веса, повышению амплитуды и уточнению частоты колебаний вальца, разные сочетания которых дают в конечном итоге самое главное для уплотняющей способности виброкатка — амплитудное значение центробежной силы и ее качественную характеристику («острая» или «тупая», быстродействующая или вялодействующая вибросила).

Относительно изменения весовых показателей катков можно отметить, в частности, появление самого тяжелого

на сегодня виброкатка BW226 фирмы Bomag, одна из модификаций которого имеет общий вес почти 27 т вместе с самым тяжелым вибровальцовым модулем (18,6 т).

Кстати, иногда вызывает удивление уже устоявшаяся практика для одновальцовых шарнирно-сочлененных виброкатков приводить в технической литературе совместный вес вибровальцового модуля и пневмокошечного тягача-толкача. Ведь не добавляют же к весу прицепного виброкатка вес тягача. Тем более, что в функционально-технологическом плане «главным действующим лицом» являются вес, габариты и другие показатели вибромодуля (вибровальца), которые и определяют его уплотняющую способность и эффективность. А весовые данные тягача для этих показателей в том и другом случае не играют роли.

Помимо некоторой прибавки в весе у отдельных катков возросло также максимальное значение центробежной силы, как, например, у самой крупной модели фирмы Bomag до появления BW226 она была 33 тс, а у последней — 40 тс. Правда, «чемпионами мира» пока остаются шарнирно-сочлененные образцы VV2510D фирмы STS (Stavostroj) и SR25D фирмы O+K (Orenstein and Koppel), у которых такая сила составляет 46 тс.

В последнее время специалисты ряда фирм осознали не только полезность, но уже даже и необходимость более широкого регулирования силовых воздействий виброкатков на уплотняемый материал. На большинстве же имеющихся сейчас в мире их моделей используется двухуровневая вибрация.

Слабый или сильный режим вибрирования устанавливается путем увеличения или уменьшения амплитуды колебаний вальца в 2 раза при реверсе вращения дебалансного вала.

На заре внедрения уплотняющей вибротехники в широкую практику дорожного строительства такая разработка фирмы Дупарас была очень полезной и прогрессивной. Это теперь двухрежимная вибрация стала явно недоста-

точной для технологии уплотнения материалов различного типа и состояния, да еще при значительном варьировании толщин уплотняемых слоев этих материалов.

И совершенно очевидно закономерным и оправданным стало появление виброкатков фирмы I-R (Ingersoll-Rand, США) с 8 амплитудами и двумя частотами колебаний вальца (вместе со статическим режимом можно получить 17 значений силовых воздействий — куда уж больше!). Теперь уже есть виброкатки с 3,4 или 5 амплитудами при одной, двух и даже трех частотах колебаний вальца (фирма Caterpillar). Однако во многих подобных разработках использован принцип дискретного регулирования уплотняющих воздействий.

Разработчиком одного из способов плавного регулирования силовых воздействий виброкатков стала фирма Bomag, заменившая на своих асфальтобетонных (BW174 AD-2, BW184 AD-2) и грунтовых (например, BW177 D-4) просто устроенные вибровозбудители с круговыми колебаниями на более сложные подобные устройства с направленными колебаниями.

Обусловлено это новшеством не различием в эффективности и качестве уплотнения материалов при их использовании (экспериментально давно показано, что особого различия нет), а возможностью у катков или вальцов с направленными колебаниями плавно изменять (поворачивать) направление вектора суммарной центробежной силы от 0 до 90°, т.е. регулировать значение вертикальной ее составляющей от нуля до максимума, плавно переводя колебания вальца с чисто вертикальных до сугубо горизонтальных. Такой способ давно применяется на виброплитах для обеспечения их самоходности с одновременным выполнением самой операции уплотнения.

Наличие возможности дискретно или плавно изменять центробежную силу вибровальца в большую или меньшую сторону, а также наличие успешно и давно работающих систем и приборов контроля

качества уплотнения грунтов по относительным (косвенным) показателям, которыми оснащены виброкатки фирм Дупарас, Bomag, Hamm и других, очевидно, и породило идею и дало толчок к их объединению с разработкой новой системы автоматического регулирования силовых воздействий в соответствии с показаниями приборов, контролирующих качество уплотнения.

Такие новые разработки были осуществлены фирмами Bomag и Ammann и установлены на образцах не только грунтовых, но и асфальтобетонных виброкатков.

Следует отметить, что автоматическая система, например, фирмы Bomag, названная для асфальтобетонных виброкатков BAM (Bomag Asphalt Manager) или просто Асфальт Менеджер, включает в себя несколько других систем и подсистем, среди которых фигурируют BTM-E (Bomag Terra Meter E) — измеритель модуля деформации грунта E, BEM (Bomag Evib Meter) — измеритель вибрационного модуля деформации Evib поверхности уплотняемого материала, BCM 05 (Bomag Compation Menegement 2005 г.) — управление уплотнением, разработка 2005 г. и другие.

Система Асфальт Менеджер позволяет непрерывно контролировать качество уплотнения материала, правда, в косвенных показателях (вибрационный или динамический модуль деформации Evib в МН/м²). Фактически впервые оказалось возможным следить за относительным результатом уплотнения асфальтобетона во время его укладки и укатки в покрытии (на земляных работах такое случилось ранее) и заблаговременно выявлять недоуплотненные места и участки. При этом непрерывным условием эффективного функционирования системы является непрерывное измерение температуры асфальтобетона, но не только.

Машинист катка с такой системой имеет возможность вмешиваться в автоматический процесс уплотнения, если температура асфальтобетонной смеси окажется очень высокой или чрезмерно низкой. Как автоматика, так и машинист в подобных случаях могут изменять силовое вибровоздействие катка, регулируя величину вертикальной составляющей центробежной силы путем поворота ее вектора, а в нужном случае даже просто отключать вибрацию вообще.



Грунтовый одновальцовый шарнирно-сочлененный каток AC110 (фирмы Ammann) оборудован электронной контрольно-измерительной системой ACE.

На первых вибротатках Bomag с Асфальт Менеджер (BW170/174 AD AM и BW184 AD AM) установлены вибровозбудители с более высокой уплотняющей способностью. Наиболее крупная модель из этих трех имеет повышенную частоту (60 Гц) при неизменной амплитуде колебаний. Но на всех трех вибротатках предусмотрен дополнительный повышенный режим силового воздействия за счет увеличения амплитуды колебаний только заднего вальца. Это запасное более мощное воздействие (в 1,5–4 раза сильнее) иногда требуется на практике для уплотнения, например, слишком остывшего асфальтобетонного материала.

На выставке Bauma-2004 в Мюнхене фирма Ammann рекламировала два новых вибротатка, оснащенных подобной электронной контрольно-измерительной системой, названной ACE (Ammann Compaction Expert) — грунтовой одновальцовый шарнирно-сочлененный AC110–3HD+ACE (общий вес 11,2 т, вес вибромодуля 7,2 т, регулирование амплитуды плавное от 0 до 2 мм, частоты колебаний в пределах 25–33 Гц, центробежной силы от 0 до 250 кН или 25 тс и рабочей скорости в пределах 0–7 км/ч) и асфальтобетонный тандем AV95ACE (вес 9,5 т, амплитуда колебаний от 0 до 1 мм, частота от 0 до 50 Гц, центробежная сила от 0 до 85 кН или до 8,5 тс и рабочая скорость от 0 до 10 км/ч).

Система ACE на асфальтобетонном вибротатке автоматически настраивает амплитуду и частоту в соответствии с ус-

тановленной рабочей скоростью катка, температурой поверхности асфальтобетона (непрерывно измеряется устройством инфракрасного типа), прочностными и деформативными характеристиками поверхности укатки (Ammann утверждает, что ACE оценивает ее несущую способность, но почему-то с размерностью МН/м).

Принцип управления ACE состоит в том, что энергия уплотнения автоматически понижается при возрастании несущей способности поверхности укатки. Подобным же образом зоны или места с пониженными показателями несущей способности уплотняются с более высокой, а очень твердые (жесткие) поверхности — с более низкой рабочей амплитудой. Регулирование амплитуды осуществляется автоматически за счет поворота одного центробежного эксцентрика относительно другого, установленных в вибровозбудителе направленных колебаний. Сама система ACE установлена в переднем или заднем вальцовом модуле. Вибрирование другого вальца происходит по автоматическим командам вальцового модуля с ACE.

Что дает использование передовой технологии уплотнения вибротатками, оборудованными системами Асфальт Менеджер, ACE или им подобными?

Во-первых, требуемое качество уплотнения материала достигается всегда, причем оно становится более равномерным по площади с отсутствием недоуплотненных и переуплотненных мест потому, что энергия уплотнения вибротатка всегда приводится в соответствие с потребностями материала. Во-вторых, практическое выполнение операции становится более легким и простым, а ошибки оператора или машиниста катка исключаются потому, что вибрационный режим укатки контролирует автоматика. В-третьих, экономятся затраты времени и энергоресурсов потому, что количество проходов катка минимизируется, а это может дать повышение производительности до 2 раз (оценка фирмы Bomag).

Новые идеи и разработки не обошли стороной и американских производителей дорожных катков. На выставке в Лас-Вегасе фирма Bomag Americas представила две модификации одного и того же вибротатка четвертого поколения, одну из которых BW190AD-4HF (вес около 12 т, амплитуда колебаний 0,37/0,86 мм, частоты соответственно 60/48 Гц и центробежные силы 13,1/18,6 тс) можно отнести к обычным высокочастотным моделям. А другую (BW190AD-4AM), оснащенную системой Asphalt Manager, можно зачислить в отряд новых образцов «умного уплотнения» (Intelligent Compaction).

Помимо этих вибротатков Bomag Americas показала также три новые свои разработки (BW266, BW278 и BW284 весового класса соответственно 9, 11 и 13 т), отличительной особенностью которых является чрезмерно высокая величина центробежной силы как на слабой (13–15 тс), так и на сильной (15–19 тс) вибрации.

Не совсем понятно, как такими мощными виброударными воздействиями можно качественно уплотнить рекомендуемые Bomag Americas слои асфальтобетона толщиной от 1,5 до 3 дюймов (от 3,5–4 до 7,5–8 см)?

В соответствии с оценкой уплотняющей способности по статическим и динамическим индексам контактных давлений оптимальные слои для эффективного уплотнения асфальтобетона этими катками составляют от 10–12 до 14–15 см на слабом режиме вибрирования вальцов, а на сильном — еще больше (от 14–15 до 17–19 см). Очевидно, самый соответствующим слоям 1,5–3 дюйма может оказаться только статический режим укатки, для которого оптимальные толщины слоев равны 6–7,5 см.

Вообще же у каждого статического или вибрационного катка, наделенного разработчиками определенными геометрическими, весовыми и вибрационными параметрами, существуют вполне конкретные оптимальные толщины уплотняемых слоев асфальтобетона, щебня или грунта.

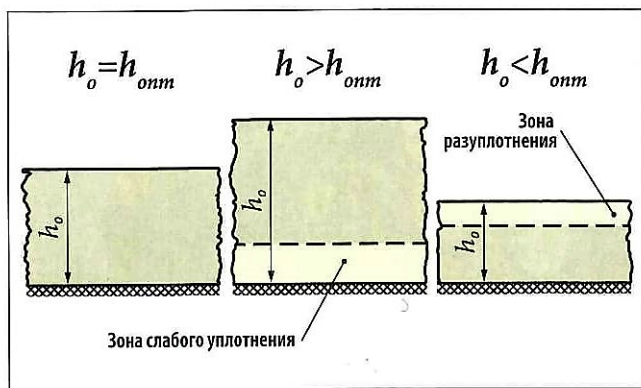


Рис. 6. Схема возможных результатов уплотнения асфальтобетона при несовпадении толщин оптимального и реального слоев:

h_{opt} — оптимальный слой уплотнения; h_0 — реальный слой.

Если реальный слой уплотнения меньше оптимального, его приповерхностная зона будет подвергаться силовым перегрузкам катком, что непременно приведет к частичному ее разуплотнению или даже разрушению (рис. 6). Если реальный слой больше оптимального, пострадает нижняя его часть, где будет иметь место недоуплотнение.

По разработанной в фирме «ВАД» методологии (индексы контактных давлений) оптимальную толщину слоя уплотнения для любого виброратка определить несложно. Следует только знать параметры виброратка и прочностные и деформативные свойства уплотняемого материала.

В качестве примера в табл. 1 даны найденные таким способом значения оптимальных слоев уплотняемого щебенистого асфальтобетона теми виброратками, которыми располагает парк фирмы «ВАД» и с помощью которых осуществляется каждодневная практическая реализация технологии высококачественного уплотнения асфальтобетонного покрытия.

Приведенные в таблице катки все разные, разные у них параметры, поэтому и оптимальные толщины слоев неодинаковые, хотя сам асфальтобетон во всех случаях один и тот же. Изменение силового динамического воздействия любого катка на асфальтобетон по мере роста его плотности и снижения температуры во время укатки хорошо иллюстрируют приведенные в таблице значения веса эквивалентного статического катка, силовое воздействие которого адекватно воздействию виброратка. Упомянутая методология «ВАД» позволяет решать и подобного рода задачи, выявляя при этом неравномерность величин оптимальных слоев на разных фазах операции укатки асфальтобетона одним и тем же виброратком. Это свидетельствует о нерациональных, а в некоторых случаях и чрезмерных значениях центробежных сил виброратков, приводящих к перегрузкам асфальтобетона, особенно на начальной фазе виброуплотнения.

Нужно с сожалением отметить, что многие фирмы-поставщики дорожных катков на мировой рынок или скромно умалчивают о реальных толщинах эффективно и качественно уплотняемых слоев, к примеру, асфальтобетона, или просто указывают, что их катки, невзирая на существенные различия в габаритах, весе и параметрах вибрации, способны уплотнять слои этого материала толщиной 5–15 см, хотя это во многих случаях сомнительно.

И пожалуй, одной из немногих фирм, которые более или менее правдоподобно и обоснованно дают своим клиентам рекомендации по рациональным режимам уплотнения тех или иных реальных асфальтобетонных слоев дорожной одежды, является американская I-R (табл. 2).

И, хотя в таблице с толщинами слоев увязаны только амплитуды колебаний вальца виброратка, не следует забывать, что хороший или плохой результат уплотнения определяет сила воздействия вибро-

вальца, а амплитуда колебаний последнего наравне с его колеблющейся массой и частотой создает центробежную вибросилу, порождающую вместе с весовой нагрузкой вальца итоговую динамическую силу уплотнения. Поэтому изменение амплитуды влечет за собой пропорциональное уменьшение или увеличение центробежной силы и соответствующее изменение общей силы уплотнения.

С увеличением толщины уплотняемого слоя и крупности щебня в составе асфальтобетона или ЩПС для слоя основания амплитуда колебаний вальца должна возрастать, а с ней и сила уплотнения, что и нашло отражение в табл. 2 фирмы I-R. Интересно, что приводимое в ней отношение толщины слоя h_0 к номинальной амплитуде $A_{ном}$ находится примерно в диапазоне $200 \leq h_0/A_{ном} \leq 100$. Почти такой же диапазон ($h_0/A_{ном} \leq 100$), правда, для ограничения только максимального значения амплитуды колебаний, ранее рекомендовал автор [2].

Фирма	Модель виброратка	Уплотняющая способность (оптимум слоя уплотнения $h_{опт}$, в числителе – при слабой, а в знаменателе – при сильной вибрации):							
		статика		вибрац.-начало		вибрац.-середина		вибрац.-конец	
		Q_s, T	$h_{опт}, \text{см}$	Q_s, T	$h_{опт}, \text{см}$	Q_s, T	$h_{опт}, \text{см}$	Q_s, T	$h_{опт}, \text{см}$
Dynapac	CC 211	7,2	5,5-6	9,6	7,0	10,2	4,5-5	11,0	4-4,5
				12,0	10,5	13,3	8-8,5	15,0	7,5
	CC 222 HF	7,7	6-6,5	12,5	10,5-11	14,0	8,0	15,8	8,0
				14,2	13,5-14	16,0	11,0	18,5	11,0
	CC 232 HF	8,4	7,5	13,3	12,0	14,7	9-9,5	16,2	8,5
				14,9	14,5-15	16,8	12,0	19,0	12,0
	CC 422	10,4	7-7,5	14,8	9,5-10	16,0	7,0	17,6	6,5
				19,8	>15	22,6	13,5	26,0	13,0
Hamm	HD75	7,6	4,5	11,6	6,5-7	12,8	5,0	14,3	4,5-5
				13,0	8,5	14,7	6,5	16,7	6,5
	HD075V	8,2	5,0	12,6	8,0	13,8	5,5-6	15,6	5,5
				12,8	8,5	14,1	6,0	15,9	6,0
	DV8.42	9,8	6,5	15,7	11,5	17,4	9,0	19,7	8,5
				16,2	12,5	18,0	9,5	20,4	9,0
	HD130	14,2	7,5-8	24,2	14,5	27,0	11,5	30,6	11,0
				28,3	>16	32,4	15,0	38,0	15,0
Bomag	BW164AD	9,2	6,0	12,2	7,0	13,0	5,0	14,0	4,5
				13,2	8-8,5	14,1	5,5	15,4	5,0
Состояние асфальтобетона по плотности (K_y) и температуре (T °C)		$K_y = 0,90-0,91$ $T = 130-125$ °C		$K_y \approx 0,93$ $T = 110-105$ °C		$K_y \approx 0,96-0,97$ $T = 100-95$ °C		$K_y = 0,98-0,99$ $T = 90-85$ °C	

Обозначения: Q – вес виброратка; Q_s – вес статического тандемного катка, эквивалентный силовому воздействию виброратка на соответствующем виброрежиме укатки.

Таблица 1. Уплотняющая способность виброратков ЗАО «ВАД» при статическом и вибрационном режимах укатки щебенистого мелкозернистого асфальтобетона (оптимум слоя уплотнения $h_{опт}$)

Уплотняемый слой дорожной одежды	Толщина слоя, $h_{\text{ср}}$, мм (дюймы)	Размер максимальной фракции щебня, мм	Амплитуда колебаний вальца $A_{\text{в}}$, мм	Положение эксцентрика вибратора на катке I-R	Отношение $h_0/A_{\text{в}}$
Верхний слой покрытия (Surface)	25–75 (1"–3")	19–25 (20–25)*	0,32–0,46	1,2,3	78–163
Нижний слой покрытия (Intermediate – средний слой покрытия, США)	75–125 (3"–5")	25–37,5 (20–40)*	0,46–0,64	3,4,5	163–195
Верхний а/б слой основания (Base – основание или третий слой покрытия)	150–200 (6"–8")	50 (20–40)*	0,76–0,91	6,7,8	197–220
Щебеночное основание (Rich Bottom – тяжелый щебеночный слой)	75–150 (3"–6")	50 (40–70)*	0,64–0,76	5,6,7	117–198

*) Используемые фракции в России.

Таблица 2. Рекомендуемые фирмой I-R (США) амплитуды колебаний вальца виброкатка для различных слоев уплотнения.

Приведенные рекомендации фирмы I-R справедливы для всех типов и образцов ее виброкатков, в том числе для нового семейства из 5 тяжеловесов класса 12, 14 и 16 т, представленных фирмой в Лас-Вегасе — DD112 и DD118 (вес 12,4 т), DD132 и DD138 (вес 13,8 т) и DD158 (вес 15,5 т).

Странная и не совсем объяснимая тенденция укрупнять и утяжелять асфальтобетонные виброкатки с усилением динамики их воздействия, если иметь в виду толщины 3–10 см верхних и нижних слоев асфальтобетонного покрытия. Первой это проделала ранее фирма Дунарас, освоив выпуск CC522HF (11,9 т), CC622 и CC622HF

(12,6 т) и CC722 (16,9 т), затем Hamm (HD120; 12,8 т и HD130; 14,2 т), Bomag (BW184 AD-2; 13,3 т), CAT (CB634D; 12,8 т) и STS (VH1700; 17 т), а теперь вот Bomag Americas и I-R.

Впрочем, такие крупные виброкатки с их существенно повышенной уплотняющей способностью хорошо вписываются в отряд тех средств, которые предназначены укатывать асфальтобетонные материалы слоями 10–20 см или щебеночные и иные основания толщиной 20–30 см.

Но новое семейство виброкатков I-R привлекает внимание не только своими габаритами и весом. Главное их достоинство и особенность состоит в том, что в свои конструкции они впитали про-

грессивные идеи и разработки последнего времени в области технологии уплотнения (регулирование уплотняющего воздействия катка, использование низкочастотного и высокочастотного режимов колебаний вальца, дискретная многоамплитудность вибрации, автоматическая настройка частоты колебаний для выбранной амплитуды, увязка рабочей скорости катка с частотой циклов нагружения материала и другое, т.е. все то, что сегодня названо Smart Drum — «умный» или интеллектуальный валец, каток).

Две модели новых виброкатков I-R DD112HF и DD132HF имеют традиционные две амплитуды колебаний, каждой из которых соответствует своя низкая (45–50 Гц) или высокая частота (67–70 Гц), а на трех образцах (DD118HFA, DD138HFA и DD158HFA) можно реализовать восемь амплитуд при двух значениях частоты колебаний — низкой в пределах 42–50 Гц и высокой 57–70 Гц, что позволяет использовать на уплотнении 16 значений центробежной силы. Это столько же, сколько имеет виброкаток DD90HF, который автору довелось эксплуатировать на объектах фирмы «Дорстройпроект» в Санкт-Петербурге.

Но в отличие от DD90HF, DD112HF и DD132HF на новых восьмиамплитудных образцах применена технология или система HFA (High Frequency Automatic — высокочастотная автоматическая) с автома-



Новое семейство виброкатков фирмы Ingersoll-Rand (модель DD-118HFA).

тической настройкой оптимальной частоты колебаний вальца для каждой выбранной амплитуды из восьми имеющихся на катке.

Как правило, для толстых слоев асфальтобетона используются большие амплитуды с меньшими частотами, для тонких применяются малоамплитудные высокочастотные колебания вальца.

Помимо системы HFA на виброкатках Smart Drum фирма I-R устанавливает и другие полезные разработки и системы:

- Smart Control Propulsion System — автоматический контроль скорости катка для поддержания выбранного машинистом расстояния между ударными импульсами или поддержания так называемого ударного пространства, что обусловлено стремлением получить ровное покрытие и связанной с этим необходимостью виброкатку создавать за один проход вальца примерно 3–4 цикла нагружения по любой точке уплотняемой поверхности или не менее 33–39 циклов на 1 м пути катка (в США 10–12 циклов на фут или 30,5 см);
- Smart Vibration System — вибрация на заднем вальце включается с задержкой на 2–3 сек. после включения ее на переднем вальце с тем, чтобы задний валец, находящийся на более остывшем асфальтобетоне,

не повредил поверхность последнего;

- Smart Water System — автоматический контроль расхода воды на смачивание вальцов в зависимости от скорости катка.

Фирма Caterpillar тоже регулярно проводит технологическое и конструктивное обновление своих дорожных катков. И хотя ее всегда отличали осмотрительность, неспешность и солидность такой работы, тем не менее за последние 2–3 года модернизации и усовершенствованию подверглась почти вся номенклатура выпускаемой уплотняющей техники.

Но наиболее глубокой и принципиальной переработке подверглись асфальтобетонные виброкатки. Фактически заново были разработаны тандемные образцы классов 7, 10 и 12 т, особенно в части интеллектно-технологической их начинки.

Теперь эти новые модели оснащаются электронной автоматикой контроля и настройки рабочей скорости катка с целью обеспечения необходимых для качества уплотнения асфальтобетона и ровности покрытия 33–39 циклов нагружения вибрвальца на 1 м пути (система ASC).

Вместо ранее существовавшего одного стандартного виброразбудителя на всех катках фирмы (две амплитуды и од-

на частота колебаний) теперь могут быть использованы два базовых варианта, один из которых остался прежним (стандартным), но с его модификацией по системе Versa Vibe, позволяющей иметь 8 значений центробежной силы за счет 4 различных амплитуд в каждом из двух частотных диапазонов вибрирования вальца.

Второй базовый виброразбудитель имеет уже 5 амплитуд, позволяет реверсировать вращение дебалансов при изменении направления хода катка. Последнее, по утверждению фирмы, снижает волнообразование (улучшает ровность) и исключает появление макротрещин на поверхности укатки.

Разновидностью второго базового пятиамплитудного виброразбудителя является запатентованная система Vari Vibe, обеспечивающая уже плавное изменение амплитуды колебаний при трех фиксированных частотах, что позволит реализовывать на виброкатке три диапазона, плавно изменяющихся от 0 до максимума центробежных сил. Это расширит технологические возможности виброкатка и сделает его более универсальным уплотняющим средством и достаточно привлекательным для дорожников.

А что же из привлекающих внимание новинок продемонстрировала в Мюнхене и Лас-Вегасе фирма Hamm (в США — Hamm America), которую по праву считают одним из мировых лидеров в области разработки и производства уплотняющей техники?

Пожалуй, можно отметить две таких новинки:

- обозначившийся приоритет выпуска асфальтовых моделей виброкатков с жесткой рамой и управляемыми системой Hammtronic поворотными вальцами (серия DV) вместо моделей с шарнирно-сочлененной рамой (серия HD);
- установка на виброкатках новой серии DV системы рулевого управления джойстиком HI-DRIVE (Hamm Intelligent Drive).

Эти новинки можно обнаружить на трех последних новых типах виброкатков Hamm —



Каток DV90 (фирма HAMM) оснащен системой рулевого управления джойстиком HI-DRIVE.

DV40 (4,2 т), DV70 (7,5 т) и DV90 (9,5 т), причем каждый из них может иметь два варианта исполнения. По первому из них на образцах DV40VV, DV70VV и DV90VV смонтированы передний и задний вальцы с обычными вибровозбудителями круговых колебаний, а на DV70VO и DV90VO передний валец тоже создает круговые колебания, а вот задний совершает крутильные колебания вокруг собственной оси, т.е. совершает небольшие реверсивные осцилляции (угловые отклонения), что и дало такого рода каткам название «осцилляторные». Осцилляторное уплотнение материала осуществляется по силовому принципу одновременного или совместного действия сжатия и реверсивного сдвига.

По многолетним утверждениям и рекламе, осцилляторные катки фирмы Hamm имеют преимущество перед обычными виброкатками при уплотнении асфальтобетона на мостах, путепроводах, внутри помещений, у фундаментов зданий и сооружений, т.е. там, где недопустимо (запрещено) или ограничено по условиям безопасности инженерных устройств использование традиционной вибрации. На первый взгляд, все вроде бы правильно и логично.

Однако экспериментальные данные самой же фирмы Hamm (см. таб.3 и диаграмму на рис. 7) подвергают сомнению возможность реализации требуемого качества уплотнения асфальтобетонного покрытия на мосту или путепроводе при использовании ее катков только с осциллирующим валь-

цом. Фирма не выпускает тандемные катки с одними осциллирующими вальцами. Все они оборудованы спереди вибрирующим и, как правило, сзади таким же, но осциллирующим вальцом. Очевидно поэтому эти катки точнее и правильнее было бы именовать вибрационно-осцилляторными.

Тем российским дорожникам, которые уже обладают осцилляторными катками или кто намерен их приобрести, следует это учитывать, и на мостах и путепроводах вслед за осцилляторным обязательно должен использоваться тяжелый статический каток с надлежащим контактным давлением вальца, чтобы в конечном итоге получить требуемое качество уплотнения асфальтобетона. Объяснить неважные результаты уплотнения осцилляцией и статикой и достаточно высокие (99,2 %) при совместном воздействии вальцов с вибрацией и осцилляцией, которые, кстати, схожи с результатами практической проверки единственного у фирмы «ВАД» осцилляторного катка HD075V, несложно, если предположить с учетом данных таб. 3, что:

1. осцилляторный валец катка обладает низкой уплотняющей способностью, пригодной только для тонких или очень тонких слоев асфальтобетона в не очень плотном и прочном состоянии;

2. вибрационный валец своими чрезмерными динамическими воздействиями перегружает уплотняемый асфальтобетон, и низкая плотность последнего является результатом разуплотнения или даже частичного разрушения припо-

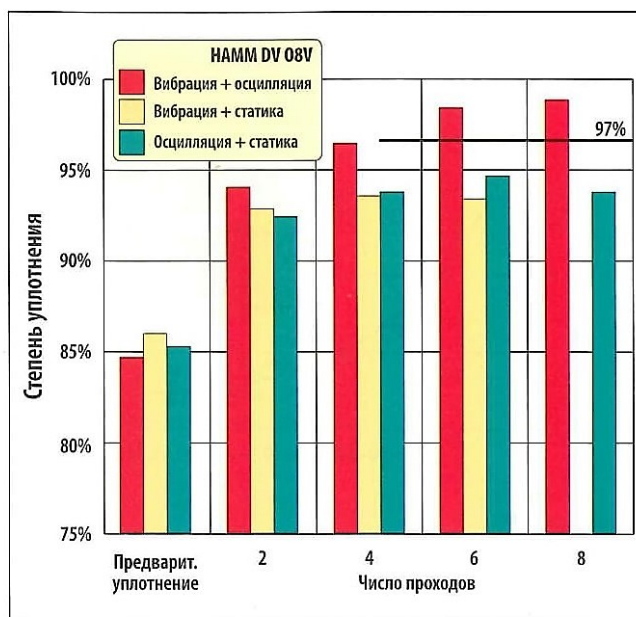


Рис. 7. Диаграмма фирмы Hamm результатов уплотнения асфальтобетона осцилляторным виброкатком DV08V.

верхностной зоны укатываемого слоя (об этом уже сказано выше) и, видимо, недостаточных силовых воздействий следом идущего статического заднего вальца, чтобы поправить итоговый результат уплотнения в лучшую сторону;

3. комбинированное воздействие двух разных вальцов (вибрация и осцилляция) с хорошим итогом качества уплотнения возможно только когда передний валец эффективно уплотняет своими избыточными усилиями в основном нижнюю часть укатываемого слоя с некоторым разуплотнением приповерхностной его части, а следом идущий задний валец с осцилляциями как «санитар», своими хотя и слабыми воздействиями, но более эффективными, чем у статического вальца, исправляет эти разуплотнения, т.е. оба вальца работают по схеме «сначала один калечит, а затем другой лечит».

В свое время автор со своими сотрудниками лаборатории технологии и механизации дорожно-строительных работ филиала СоюздорНИИ в Санкт-Петербурге проводил обстоятельные и обширные теоретические и экспериментальные исследования осцилляторного способа уплотнения [3]. Было

Количество проходов катка	Степень уплотнения асфальтобетона (%) при использовании:		
	осцилляции	вибрации	совместно
	Вальцы: передний – статика задний – осцилляция	Вальцы: передний – вибрация задний – статика	Вальцы: передний – вибрация задний – осцилляция
Предварит. уплотнение – укладчик	85,3	86,0	84,6
2	92,4	92,9	94,1
4	93,8	93,6	96,6
6	94,8	93,5	98,6
8	93,9	-	99,2

Таблица 3 Результаты уплотнения асфальтобетона вибрационно-осцилляторным катком DV08V (см. диаграмму фирмы Hamm, рис. 7)

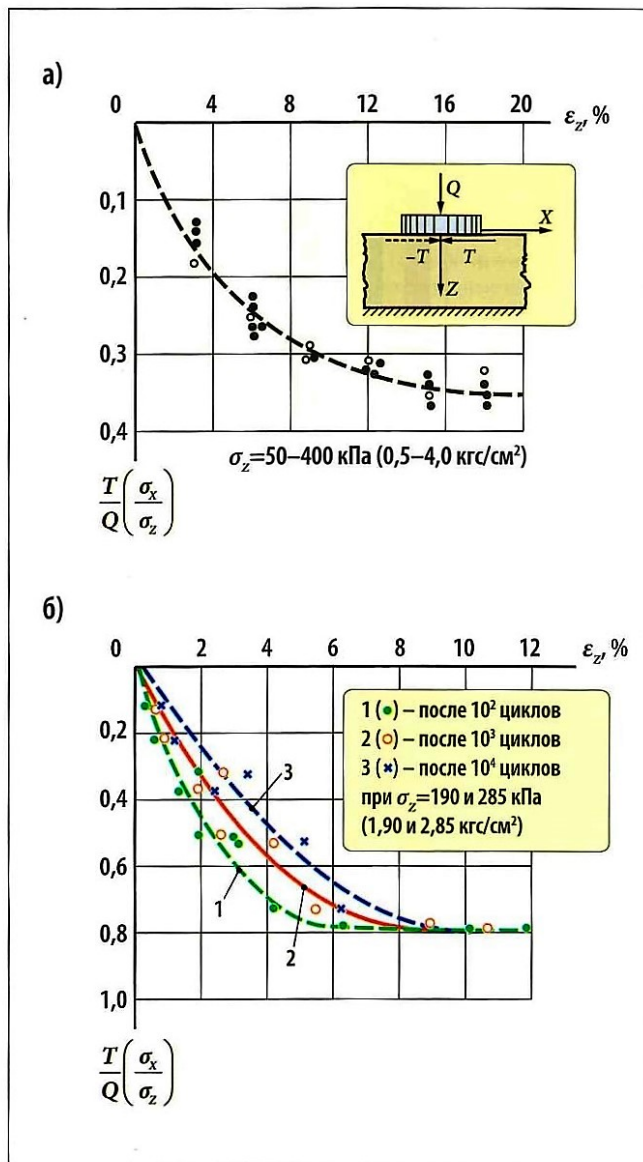


Рис. 8. Влияние отношения горизонтальной (T) к вертикальной силе (Q) на деформацию уплотнения песка (а) и щебня (б).

установлено, что этот способ эффективен при соблюдении следующих условий:

- толщины уплотняемых слоев не могут быть большими, т.е. осцилляторный способ целесообразен на укатке в основном асфальтобетонных покрытий и щебеночных оснований с ограничением максимального слоя толщиной около $1,0 b$, или до 10–20 см;
- отношение горизонтальной осциллирующей силы к вертикальной постоянно действующей силе веса вальца не может быть произвольным, а должно быть вполне определенным и оптимальным, если преследуется цель получить

наибольший уплотняющий эффект, причем для разных материалов оптимум различен (рис. 8);

- для наилучшей передачи уплотняемому материалу горизонтальных усилий поверхность вальца катка должна иметь высокий коэффициент сцепления или зацепления с поверхностью качения, иначе будет происходить проскальзывание вальца с его абразивным износом и значительным снижением эффективности уплотнения, что, кстати, относится не только к осцилляторным моделям, но и к обычным виброкаткам с изменяемым направлением вектора центробежной силы для регулировки вертикального силового воздействия, которое используют фирмы Bomag и Ammann в новых своих разработках; для асфальтобетонных осцилляторных катков наиболее подходящим материалом для поверхности вальцов является резина с коэффициентом сцепления почти в 1,7–1,8 раза больше, чем у стали;

- наилучшему уплотнению соответствует оптимальная частота крутильных колебаний осцилляторного вальца; в частности, при укатке слоя 4–5 см мелкозернистого мелкощебеночного асфальтобетона (тип А) 8–12 проходами лабораторного одновальцового осцилляторного катка (изменение веса — 200, 400 и 600 кг) с обрешеченной поверхностью вальца (диаметр 360 мм, ширина 500 мм) оптимальная частота оказалась около 70–75 Гц, и ей соответствовала 100% и даже выше степень уплотнения (рис. 9).

Если у малогабаритных или крупных чисто осцилляторных катков или вальцов будут соблюдены перечисленные условия, их функциональная эффективность заметным образом возрастет до уровня реализации потребного качества для мостов и путепроводов. Это относится и к осцилляторным каткам фирмы НАММ. А пока частоты крутильных колебаний у них низкие (30–39 Гц), центробежные силы (около 7–14 тс), порождающие горизонтальные усилия воздействия на уплот-

няемый материал, чрезмерны по сравнению с весовой нагрузкой вальца (3,8–5 тс), да и к тому же поверхность последнего металлическая.

Автор является поклонником осцилляторного способа и сторонником использования осцилляторных катков в дорожной отрасли, потому и надеется на дальнейшее их усовершенствование в соответствии с научными результатами и на получение от них подобающего высокого эффекта уплотнения.

К тому же давно назрела потребность полезные и достаточно популярные у дорожников пневмошинные катки статического типа перевести в разряд динамических средств уплотнения. А осцилляторный способ как нельзя лучше для этого подходит. Тем более, что такие попытки предпринимались во Франции (по патенту № 2620467 импульсное кратковременное затормаживание катящейся шины создает горизонтальное контактное усилие, действующее одновременно с вертикальной силой тяжести, но это усилие неререверсивное). У автора тоже есть разработанная принципиальная схема наделяния пневмошинного катка осцилляторными способностями.

Недавно в Европу поступила информация из Японии о том, что фирма Sakai демонстрировала в конце 2004 г. на своей национальной выставке вибраторный пневмошинный каток. Если это каток осцилляторного типа, то такую разработку следует приветствовать и проявлять к ней профессиональный интерес. Но если же это очередная попытка перевести пневмошинный каток в обычный вибраторный, то здесь нужна некоторая настороженность. Такого рода работы проводились когда-то в СССР, Чехословакии и США, но ничего толкового из этого не вышло, да и не могло выйти по физико-механическим причинам.

Приведенный аналитический обзор и перспективный взгляд на проблему разработки более эффективных технологий и средств уплотнения грунта, щебня, асфальтобетона и иных дорожных материалов

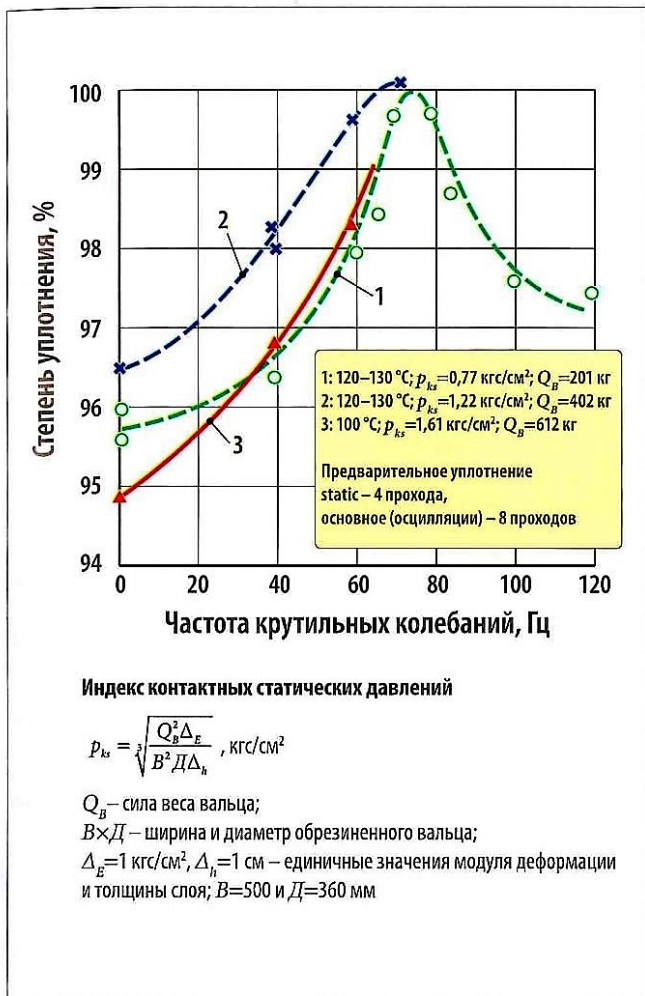


Рис. 9. Результат уплотнения слоев (4–5 см) щебенистого асфальтобетона лабораторным осцилляторным катком с обрезаемым вальцом

вселяют определенный и вполне оправданный оптимизм. Тем более, что поиски и серьезные работы в этом направлении продолжают.

В 2005 г. дорожное сообщество США объявило международный конкурс на разработку и создание умной (интеллектуальной) системы технологического управления работой механических средств, используемых на уплотнении грунтов земляного полотна и материалов дорожного основания, т.е. дорожники США тоже хотят иметь «умные» дорожные катки.

В последнее время стало модным почти все новинки бытового и производственного назначения называть «умными» — холодильники, стиральные машины, электробритвы, светофоры на перекрестках, полы в квартирах (теплые), гидромолоты на экскавато-

рах для разрушенияносимых зданий и даже лекарственные таблетки и витамины, а теперь и «умные» дорожные виброкатки.

Среди подобных вещей и устройств есть такие, которые сделаны с приложением максимума умственных способностей и возможностей их создателей. В этом смысле можно согласиться с термином «сделано сумом». Но есть, например, самонастраивающиеся гидромолоты, а теперь и виброкатки, оснащенные некоторыми интеллектуальными (умными) способностями анализировать по каким-то критериям качество своей работы и корректировать режим ее выполнения в соответствии с этим качеством. Это уже не автомат, а нечто большее, которое можно по праву называть «умный гидромолот» или «умный виброкаток» в отличие, напри-

мер, от виброкатка, сделанного с умом.

В связи с европейскими разработками и американским конкурсом следует заметить, что дорожные катки, по глубокому убеждению автора, должны быть не только «умными», но и сделанными с умом в технологическом плане, причем в первую очередь последней. А система технологического управления качеством уплотнения асфальтобетона, щебня или грунта должна предусматривать два уровня или два этапа:

- первый (предварительный) — подбор необходимого типа и модели виброкатка в соответствии с типом, начальным состоянием и толщиной слоя уплотняемого материала, определение его статического веса (он должен регулироваться в допустимых пределах) для создания начального индекса контактных давлений вальца, выявление пределов изменения амплитуд, частот и центробежных сил вибровозбудителя от начальной и до конечной вибрационных фаз операции укатки, определение оптимальной рабочей скорости катка и потребного количества его проходов и других технологических показателей; на этом эта-

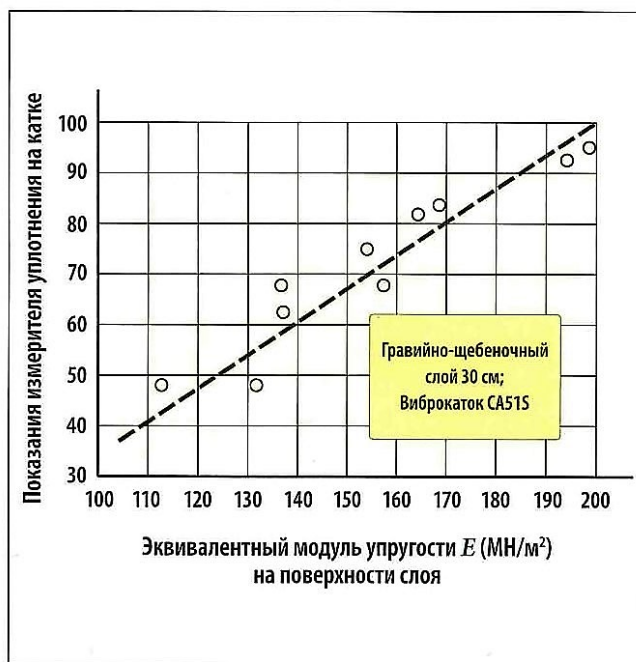


Рис. 10. Зависимость показаний измерителя качества уплотнения гравийно-щебенистого слоя на виброкатке (условные единицы) от модуля упругости (построена по данным L. Forsblad и H. Thurner)

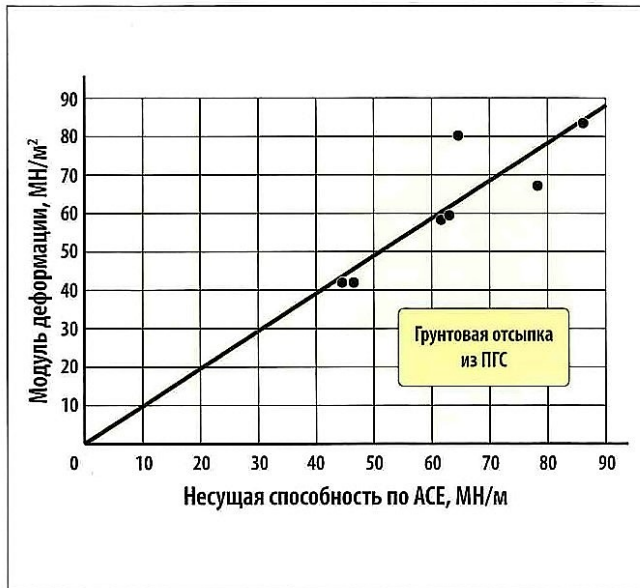


Рис. 11. Корреляция между модулем деформации (штамповые тесты) и несущей способностью грунтовой отсыпки из ПГС по показателю АСЕ фирмы Аттманн.

пе крайне важно иметь каток, сделанный с умом;

- второй (основной) — настройка катка и его системы управления на параметры, установленные на первом этапе, выполнение самой операции укатки с включением в работу системы автоматического управления качеством уплотнения по одному из принятых критериев оценки этого качества; на этом этапе важно иметь уже «умный» каток.

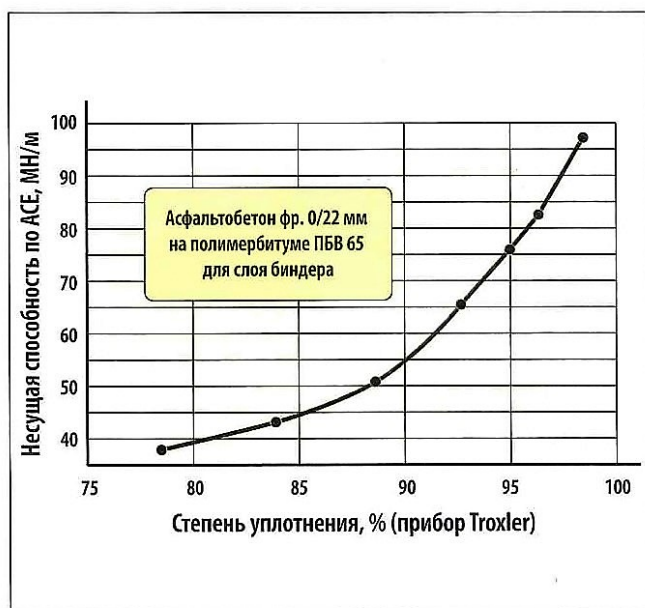


Рис. 12. Зависимость показаний системы АСЕ фирмы Аттманн от степени уплотнения асфальтобетона.

Критериями оценки качества уплотнения материала и эффективности работы виброкатка могут быть приняты любые показатели и величины, пропорциональные тестуемому качеству:

1. несущая способность уплотняемой поверхности в виде ее динамического или вибрационного модуля деформации, что принято фирмой Bomag в системе Асфальт Менеджер; использовать модуль упругости, видимо, нецелесообразно из-за сложностей его определения, хотя и модуль деформации измерять точно не так-то просто (достоверно нужно знать динамическую силу воздействия вальца, площадь его контакта с поверхностью укатки и осадку этой поверхности, а полной ясности здесь пока нет);

2. отношение амплитуд колебаний вальца $A_0/A_{н}$, где A_0 — реальная амплитуда, которая по мере роста плотности, прочности и, например, снижения температуры асфальтобетона, т.е. за счет упругой отдачи поверхности, непрерывно возрастает до $(2-2,5) A_{н}$, где $A_{н}$ — номинальная или паспортная амплитуда;

3. остаточная деформация уплотняемой поверхности асфальтобетона, измеряемая с помощью нескольких лазерных или ультразвуковых высокоточных (до 0,1–0,2 мм) датчиков, установленных на раме катка перед передним и за задним вальцами;

4. показатель пенетрационных испытаний укатываемой поверхности; в качестве такого непрерывно действующего пенетromетра может выступать сам валец катка; так фактически и поступили Lars Forssblad (Dynapac) и Heinz Thurner (Geodynamik), когда они создавали всем теперь известную на виброкатках систему контроля качества уплотнения грунтов в условных (пенетрационных) единицах, которые достаточно приемлемо коррелируются с несущей способностью поверхности укатки [6], в том числе с модулем упругости (рис. 10).

Подобным же образом поступила и фирма Аттманн, установившая вполне определенную зависимость между

показаниями своей системы АСЕ (почему-то размерность МН/м) и модулем деформации песчано-гравийной смеси (рис. 11), а также качеством уплотнения асфальтобетона (рис. 12). В фирме «ВАД» также получена прямолинейная связь между модулем деформации щебеночного слоя основания, измеряемого переносной УДН из Германии, и данными пенетрационных тестов по приборам относительного качества уплотнения на виброкатках СА302D (Дупарас) и Hamm 3414 (см. статью автора по щебеночному основанию в этом сборнике).

Когда-то английские ученые попытались сравнить умственные способности мужчин и женщин с помощью индекса или показателя IQ — Intellect Quality (у самых гениальных мужчин $IQ \approx 150$). Может наступят такие времена, когда различные модели «умных» виброкатков разных фирм и стран будут сравнивать не только по общему весу или уплотняющей способности, но и по показателю IQ.

Литература

1. Журнал «Bomag News». Issue 1/2004, p. 11
2. Костельов М. П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков. Каталог-справочник «Дорожная техника и технология», 2003, с. 12–22
3. Костельов М. П. и др. Новый способ уплотнения дорожно-строительных материалов. — Автомобильные дороги, 1991, № 6, с. 13–15
4. Ковтун В. В. Изучение процесса деформирования сыпучих материалов при сдвиге в условиях плоской деформации. — Основания, фундаменты и механика грунтов. 1988, № 2, с. 24–26
5. Brown S. F., Ansell P The influence of repeated shear reversal on the compaction granular material. — International conference on compaction. Vol. 1, Paris, 1980, p. 25–27
6. Forssblad L. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований. Пер. с англ. под ред. Костельова М. П. Транспорт, 1987, 191 с.