

**Костельов М. П.,**

*к.т.н., главный технолог  
ЗАО «ВАД» (г. Санкт-Петербург)*

## ОПЯТЬ О КАЧЕСТВЕ И ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРУНТОВ СОВРЕМЕННЫМИ ВИБРОКАТКАМИ\*



**Об авторе:**

**Костельов М. П.** В 1959 г. закончил Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский технический университет). Работал одним из руководителей Угловского комбината по производству строительных материалов (Новгородская обл.)

С конца 1960 г. в течение 33 лет работал в Ленинградском филиале СоюздорНИИ, в том числе 22 года руководил лабораторией технологии и механизации дорожно-строительных работ. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию.

В 1994 г. переведен в Дорожный комитет Ленинградской области советником Председателя. В 1998 г. перешел на работу в фирму «Дорстройпроект» на должность главного технолога, а с 2003 г. трудится в такой же должности в фирме ЗАО «ВАД».

Является одним из инициаторов и научным редактором полезного для дорожников ежегодного издания каталога-справочника «Дорожная техника и технология», выпускаемого уже 9 лет.

Неутомимый популяризатор высокого дорожного качества, современных машин и новых технологий. Имеет более 300 публикаций научного и прикладного характера.

**В** давние времена пешеходные тропы, различные пути и проезды для перемещения телег, повозок и колесниц люди всегда старались прокладывать по прочной естественной грунтовой поверхности. С развитием цивилизации и транспортных средств (конные и паровые экипажи, железнодорожные поезда, автомобили) верхняя часть таких проездов и дорог постепенно и непрерывно совершенствовалась и улучшалась за счет использования новых и все более прочных материалов и конструкций. А нижняя их часть по-прежнему оставалась грунтовой и служила естественным основанием и фундаментом для вышележащих слоев. В конструкции современной автомобильной дороги тоже присутствует грунтовая ее часть в виде естественного основания и земляного полотна с той же важной функцией своеобразного прочного и устойчивого фундамента для дорожной одежды в целом. С течением времени требования к прочности и устойчивости всех элементов дорожной конструкции, в том числе и к земляному полотну, постоянно повышались. И не только по причине роста нагрузок транспорта, но и за счет все более детального учета воздействий погодноклиматических природных факторов (вода, солнце, мороз).

Сегодня, пожалуй, наиболее ответственными транспортными сооружениями следует признать железнодорожные и автомобильные высокоскоростные магистрали (ВСМ), по которым перемещаются поезда со скоростями до 300–350 км/ч и автомобили на скоростях 120–150 км/ч и даже иногда больше. И чтобы эти поезда и автомобили не оказывались под откосами, требуется высочайшее качество и надежность строительства и эксплуатации таких магистралей.

Их земляное полотно должно поэтому отвечать целому ряду специфических требо-

ваний и ограничений, суть которых сводится практически к отсутствию остаточных деформаций грунта. К примеру, на поверхности земляного полотна железнодорожной ВСМ (под защитным слоем подрельсового пространства) при воздействии скоростной поездной нагрузки допускается иметь ничтожно малую остаточную деформацию или осадку, не превышающую накопленных ее величин всего 0,03 мм за 1,0 млн.т брутто нагрузки поезда. А максимальная величина чисто упругой осадки основной площадки подрельсового пространства не должна быть больше 1,0 мм.

Такие необычайно «крутые» требования по безосадочности, прочности, жесткости и устойчивости земляного полотна, видимо, оправданы, но они, в свою очередь, накладывают особые условия, во-первых, на выбор типов, разновидностей и состояний укладываемых грунтов в насыпи и, во-вторых, на высокое качество их уплотнения. В частности, коэффициент уплотнения грунта верхней части земляного полотна (под защитным слоем) на многих железнодорожных ВСМ должен быть не менее 1,0, а в нижней части — 0,98 и выше.

Нормы уплотнения грунтов земляного полотна автомобильных дорог тоже достаточно высокие, в том числе и в России. Они вполне достаточны для обеспечения эксплуатационной стабильности и надежности сложного и дорогостоящего инженерного сооружения, каковым является автомобильная дорога.

Хотя порой и раздаются предложения и призывы к ужесточению норм плотности грунтов, особенно когда в очередной раз обнаруживается определенная порция дефектов, брака или даже разрушений на некоторых ответственных дорож-

\* Более ранние публикации по этой проблеме можно найти в каталоге-справочнике «Дорожная техника и технологии (ДТТ)» за 2000, 2002 и 2004 годы

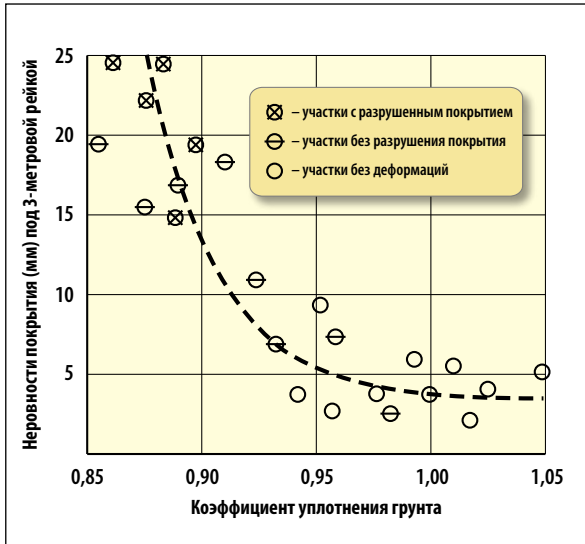


Рис. 1. Влияние качества уплотнения земляного полотна на состояние покрытия обследованных дорог (ровность, деформации, разрушения).

ных объектах, в том числе на вновь построенных крупных.

Такие призывы и предложения являются субъективными и мало чем обоснованными потому, что в тех массовых местах и на большинстве тех объектов, где сделан правильный выбор грунтов и где качество их уплотнения соответствует рекомендациям и требованиям действующих дорожных норм и правил, дефектов, просадок и тем более разрушений дорожной одежды по вине земляного полотна не происходит (рис. 1). Это подтверждает широкая дорожная практика, в том числе последних лет.

Вообще же следует особо заметить, что грамотное и тщательное уплотнение грунта — единственный путь создания доброкачественного и надежного автодорожного земляного полотна. Достойной альтернативы этой важной технологической операции фактически нет. Никудашный по состоянию и свойствам грунт можно либо улучшить добавками извести, золы уноса, цемента или битума, либо заменить его на более кондиционный тип. Но и в первом, и во втором случае ожидаемый эффективный результат (прочное и устойчивое земляное полотно) будет невозможно без надлежащего уплотнения каждого из этих грунтов.

Как правило, для сооружения земляного полотна используются имеющиеся многообразные местные грунты. По степени связности в соответствии с общестроительной или ранее существовавшей и удобной дорожной классификацией их можно подразделить на четыре вида, каждый из которых внутри себя имеет несколько разновидностей:

- несвязные — скально-крупнообломочные, песчано-гравийные, пески крупные, средние, мелкие или пылеватые;
- слабосвязные (малосвязные) — супеси легкие крупные, легкие, пылеватые или тяжелые;
- связные — суглинки легкие, легкие пылеватые, тяжелые или тяжелые пылеватые;

Таблица 1. Ограничения на использование различных видов грунтов в земляном полотне автомобильных дорог.

Вид грунта	Применение	Ограничения на применение
Скальные, крупнообломочные, песчаные дренирующие, супеси легкие крупные	Во всех случаях	Без ограничений по требованиям обеспечения устойчивости земляного полотна
Недренирующие мелкие и пылеватые пески и супеси легкие и тяжелые	Во всех случаях и условиях, за исключением болот III типа	Применение ограничено по условиям производства земляных работ, связанных с отсыпкой грунта в воду
Все глинистые грунты, за исключением особых их разновидностей	Во всех случаях при влажности, не превышающей норм для реализации качественного уплотнения	Ограничено применение по условиям влажности естественного основания и состоянию грунтов, укладываемых в насыпь при производстве земляных работ

(2 – 0,005 мм), пылеватыми (0,05 – 0,005 мм) и глинистыми (меньше 0,005 мм) частицами грунта. Данная классификация полезна своей наглядностью с точки зрения предварительной общей оценки свойств каждого вида или разновидности грунта, возможностей его использования для сооружения земляного полотна и, наконец, перспектив его успешного и высококачественного уплотнения.

Все еще действующие сегодня дорожные СНиПы и Руководства по проектированию и сооружению автомобильных дорог не дают достаточно ясных и исчерпывающих указаний по типам и состояни-

ям грунтов, допускаемых в земляное полотно без ограничений, с некоторыми определенными ограничениями или не допускаемых вообще. В более же ранних нормативных инструкциях и указаниях ответы на эти вопросы можно было найти, часть из которых приведена в обобщенной табл. 1. А в дополнение к ней полезно дать перечень грунтов особых разновидностей и состояний, которые, как правило, не допускаются в земляное полотно:

- глинистые сильно засоленные;
- глинистые сверх меры переувлажненные;

- торф, ил и связные с примесями органики, торфа или ила;
- почвенно-растительный слой, черноземы;
- тальковые, меловые, сланцевые и трепелы (мелкий кремнезем) в мокрых местах;
- с гипсовыми примесями (содержание больше 20 – 30 %);
- лёссы (разновидность пылеватых глин) в I-III дорожно-климатических зонах;
- подвижные мелкие барханные однородные пески.



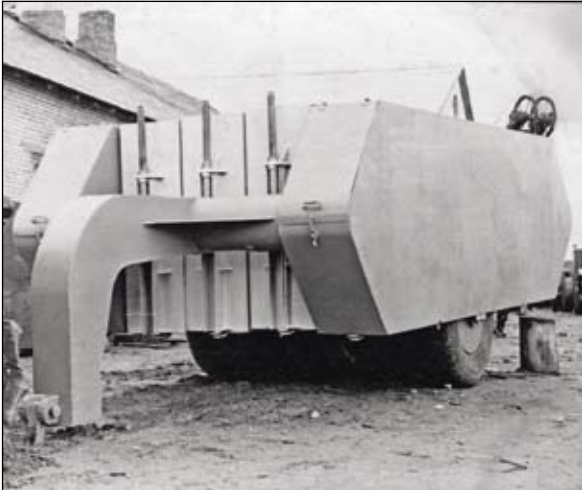


Рис. 2. Один из первых отечественных прицепных пневмокатков на широких авиационных шинах (разработка Ленфилиала СоюздорНИИ и Талсинского ДСР-3, Латвия)

Уплотнение грунтов, допускаемых в земляное полотно, в том числе с некоторыми условиями и ограничениями, может быть осуществлено методами чисто статического, вибрационного или ударного нагружения. Правда, в последние годы появились грунтоуплотняющие средства виброударного (частоударного), осцилляторного и комбинированного воздействия на материал.

Старшее поколение дорожников помнит еще не столь отдаленные времена (всего-то 30–35 лет назад), когда уплотнение грунтов в нашей и других странах мира выполнялось по большей части статической укаткой. При этом использовались в основном прицепные и полуприцепные пневмошины катки с рабочей нагрузкой на одно колесо 3–5 т (рис. 2).

Реже, но на дорожных стройках тоже были кулачковые и решетчатые статические катки. А с более широким появлением вибрационных катков использование таких статических методов и средств уплотнения постепенно сокращалось и в настоящее время практически прекратилось. Пожалуй, ни одна фирма в мире, может быть за каким-нибудь редким или единичным исключением, больше не выпускает статических грунтоуплотняющих катков, в том числе всегда и везде «уважаемых» и любимых дорожниками и самых когда-то распространенных пневмоколесных. Сегодня на дорожных стройках можно встретить лишь самоходные образцы таких катков с нагрузкой на шину 1–3 т, которые успешно ведут отделку поверхности готового песчаного подстилающего слоя и земляного полотна или уплотнение слоев асфальтобетонного покрытия.

Все грунтоуплотняющие работы повсеместно теперь выполняются разного типа, размера и веса виброкатками с гладкими (несвязные и малосвязные грунты и ма-

териалы) и кулачковыми (связные и сильносвязные грунты). Причем, катки эти могут быть либо прицепными к гусеничным или колесным тягачам, либо шарнирно-сочлененными с одноосным пневмошинным тягачом. Последние преобладают в мире по количеству и объемам выполняемых работ, так как они имеют определенные преимущ-

ества перед прицепными моделями. Во-первых, способны вести укатку грунта члечным способом, не разворачиваясь для обратного хода на порой узкой полосе работы на насыпи. Во-вторых, такие катки за счет шарнирного соединения с тягачом имеют несколько меньшую габаритную длину и большую подвижность и маневренность на рабочей захватке насыпи.

Общее количество выпускаемых в мире грунтовых виброкатков разными фирмами и странами исчисляется сотнями, причем каждая из таких фирм считает необходимым производить от чуть менее десяти (5–8) до нескольких десятков моделей общим весом каждой из них от 4–5 до 26–27 т с соответствующими габаритными размерами.

Только три крупных мировых лидера (Bomag — 50, Дунарас — 45 и Hamm — 37 моделей) вместе создали и предлагали в 2007 г. своим потенциальным покупателям 132 разнообразных разработки таких катков, что составляет 63% от общего их количества (211 моделей), имеющих на витрине продаж десяти известных в Европе и Америке и конкурирующих между собой производителей этой техники.

Одним словом, выбрать на любой вкус и вес. Однако правильный выбор необходимого варианта грунтоуплотняющего виброкатка из-за такого обилия и разнообразия фирм и моделей бывает крайне затруднен.

Настоящая публикация отчасти призвана не только оказать по-

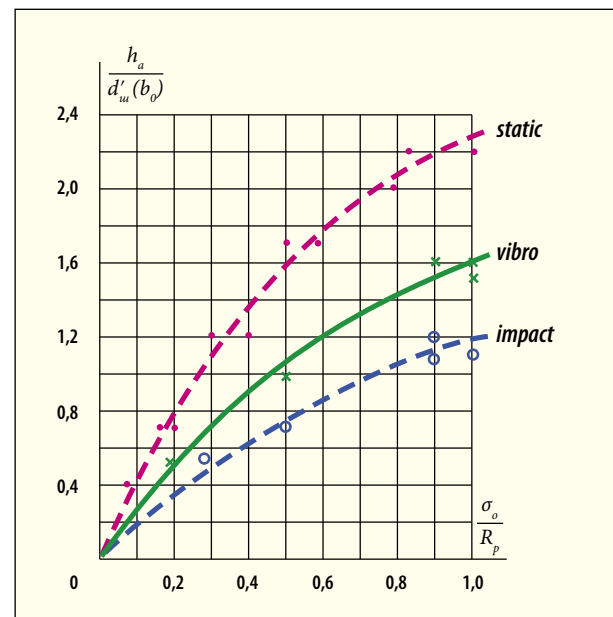
мощь российским дорожникам в разрешении подобных затруднений, но и дать функционально-технологические ориентиры и критерии для правильного эффективного применения на практике намеченного к приобретению или уже имеющегося виброкатка.

При решении таких вопросов и задач не следует упускать из вида два важных момента. Во-первых, то, что каждый тип или разновидность грунта с его реальным гранулометрическим составом, состоянием по влажности и плотности в момент выполнения операции уплотнения (а этим определяются основные его физико-механические свойства, в том числе деформативно-прочностные) обладает вполне конкретной, только ему присущей уплотняемостью или способностью деформироваться в большей или меньшей степени при приложении к нему определенного по величине воздействия статического, вибрационного или ударного характера.

Во-вторых, при уплотнении одного и того же грунта разными по весу, габаритам и силовому воздействию виброкатками результаты этой операции окажутся тоже неодинаковыми как по степени уплотнения, так и по толщине проработанного слоя. Это объясняется различной уплотняющей способностью самих катков, которую можно оценивать путем сравнения максимальной величины удельных контактных давлений их валцов на поверхность укатки с пределом прочности (разрушения)  $R_p$  этого грунта при сжатии.

Процесс укатки грунта окажется наиболее эффективным (быстрым, качественным), если указанные контактные давле-

Рис. 3. Взаимосвязь толщины уплотняемого слоя ( $h_a/d_{kp}$ ,  $h_a/b_d$ ) с величиной контактных давлений ( $\sigma_a/R_p$ ) в относительных единицах при статическом, вибрационном и ударном нагружении грунта.



ния будут близки  $R_p$ , но не превысят этого предела. Толщина слоя такого уплотнения до минимально требуемой степени 0,95 или 0,98 зависит также от размеров вальца виброкатка (рис. 3), его скорости (обычно 3–4 км/ч) и количества проходов по месту (в пределах 6–10).

Для определения контактных давлений статических и вибрационных катков с учетом типа и состояния грунта в ЗАО «ВАД» разработаны теоретические основы, аналитические зависимости и практическая методология не только для гладких их вальцов, но и для кулачковых, решетчатых, ребристых и других им подобных (через эквивалентные ширину и диаметр вальца).

При динамическом уплотнении (сжатии) прочностные показатели песчаных, супесчаных и легких суглинистых грунтов оптимальной влажности со средней степенью уплотнения 0,93–0,95 колеблются от 4–5 до 8–12 кгс/см<sup>2</sup>. А гладковальцовые виброкатки с весом рабочего вибромодуля около 8–10 т могут, по расчетам, создавать контактные давления на такие грунты в начальной фазе их уплотнения (рыхлое или несколько подуплотненное состояние) в пределах 5–7 кгс/см<sup>2</sup>, а в конце укатки — 10–13 кгс/см<sup>2</sup>.

Прочность же связных и высокосвязных грунтов (тяжелый суглинок, глина) при оптимальной влажности существенно выше прочности несвязных и малосвязных их аналогов и может составлять 15–25 кгс/см<sup>2</sup>. С понижением реальной влажности таких грунтов их прочность повышается в 1,5 раза, или до 25–35 кгс/см<sup>2</sup> (около 0,80÷0,85 от оптимальной влажности), а порой даже в 2,0–2,5 раза, или до 40–50 кгс/см<sup>2</sup> (влажность примерно 0,70÷0,75 от оптимальной).

Уплотнять такие связные грунты возможно только крупными кулачковыми виброкатками тяжелого типа с весом вибровальцового модуля не менее 15–17 т и центробежной силой вибровозбудителя примерно 35–45 тс, способных создавать контактные давления, адекватные прочности этих грунтов. В частности, можно указать для примера, что самые крупные в мире кулачковые модели виброкатков BW 225 PD-3 фирмы *Womag* общим весом почти 25 т (вес вибромодуля 16,4 т) и SR25D фирмы *Openstein and Koppel* (вес соответственно 25,5 и 17,6 т) способны обеспечить на контакте с еще не совсем плотным связным грунтом расчетные давления 18–21 кгс/см<sup>2</sup> (слабый режим вибрации) и 23–27 кгс/см<sup>2</sup> (сильная вибрация), а на почти уже плотном грунте (конец укатки) — в пределах 30–40 кгс/см<sup>2</sup> (слабая вибрация) и 45–55 кгс/см<sup>2</sup> (сильная вибрация).

Совсем недавно фирма *Womag* на базе своего упомянутого крупного кулачкового виброкатка BW 225 PD-3 разработала и испытала новую модель виброкатка с так на-



зываемым полигональным, или попросту восьмисегментным, вальцом (рис. 4). При этом фирма, очевидно, опиралась на установленные и известные в механике грунтов закономерности и факты, согласно которым зона распространения необходимых для качественного уплотнения грунта давлений и деформаций определяется, главным образом, размерами контактной площадки рабочего органа уплотняющего средства (плита трамбующего груза, цилиндрический или кулачковый валец, ширина пневматической шины, подошва виброплиты и вибротрамбовки и т.п.) и величинами контактных давлений, создаваемых этим рабочим органом. В испытаниях этой новой

модели на сооружении железнодорожной и автодорожной насыпей из связного грунта такой виброкаток с увеличенной контактной площадкой обеспечил качественное уплотнение в слое около 100 см в то время, как такой же каток с кулачковым вальцом способен уплотнять не более 40–45 см подобного не самого связного грунта.

Это замечательный результат и несомненный прогресс в технологии уплотнения. Но не следует забывать, что он достигнут не только за счет увеличения размеров контактной площадки, но и благодаря значительным контактным давлениям вальца. И, очевидно, неслучайно для повышения

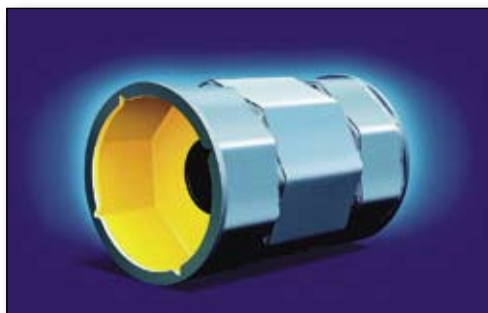


Рис. 4. Тяжелый виброкаток фирмы *Womag* с сегментной поверхностью вальца



Рис. 5. Крановый вибратор с горизонтальными колебаниями для погружения (и уплотнения) крупных камней в грунтовую насыпь и бетон

уплотняющей способности фирма Bomag создала новую версию катка с сегментным вальцом BW226DH-4 BVC с таким же весом, как у BW225D-3 BVC (около 25,2 – 25,4 т), но с более высокими значениями центробежной динамической силы (ранее она была 33 тс, затем 40 тс, а теперь уже 53 тс).

Столь высокие контактные давления и чрезмерные общие силовые воздействия виброкатка (до 40 – 50 тс) целесообразны и полезны также при устройстве земляных дорожных насыпей из крупнокусковых грунтов и материалов (скально-крупнообломочные, валунные и др.) потому, что их уплотняемость другими методами (статическая укатка) или более легкими виброкатками оказывается довольно низкой. Подтверждается это теми недопустимыми просадками (до 30 – 40 см) на некоторых автодорожных и железнодорожных объектах, которые возникли под воздействием динамических нагрузок и регулярных сотрясений земляного полотна из подобных грунтов проходящим тяжелым автомобильным и железнодорожным транспортом. Хотя уплотнение земляного полотна во время его отсыпки выполнялось добросовестно и тщательно, но статическими пневмоколесными катками. Целесообразность замены пневмокатка на крупный и тяжелый виброкаток для таких грунтов очевидна.

Однако в прошлом, когда в России грунтоуплотняющих виброкатков, в том числе крупных, еще не было, на неко-

торых больших стройках по возведению гидротехнических плотин из скально-крупнообломочных грунтов и бетона их уплотнение пытались выполнять оригинальным специально разработанным подвесным на кране и довольно габаритным вибратором (рис. 5).

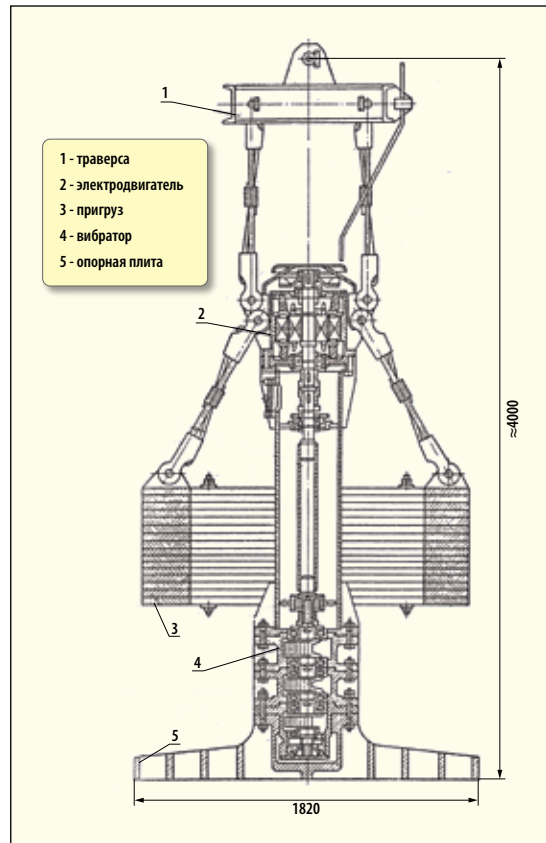
Оригинальность его состояла в том, что он создавал горизонтальные колебания (частота около 50 Гц) своей нижней и к тому же сменной опорной плитой с одной из трех возмущающих сил — 6, 12 и 18 тс. Такие колебания призваны были горизонтально смещать туда-сюда крупные камни или попросту их шевелить, а вертикально действующая сила тяжести вибратора (вес 2,2 т, а с пригрузом 8,6 т) должна была осаживать или погружать в горную массу ее крупные включения рядового размера 150 – 400 мм или отдельного штучного до 800 мм. По такой же технологической схеме уплотнения производилось также втапливание отдельных крупных валунов и камней («изюм») в бетон. Правда, производительность этого вибратора на сосредоточенных видах работ не очень впечат-

ляла — всего около 40 м<sup>3</sup>/ч на скальном грунте и не выше 80 – 100 м<sup>3</sup>/ч на уплотнении бутобетона.

Еще один практический пример трудного поиска наиболее эффективного метода и средств уплотнения другой разновидности несвязного грунта. Причем до тех пор, пока не были выявлены, изучены и учтены специфические особенности его уплотняемости, земляное полотно автомобильных дорог в большинстве своем возводилось без должного качества уплотнения, и потому их эксплуатация сопровождалась дефектами, а порой и разрушениями покрытия.

Речь идет об однородных песках, довольно широко встречающихся в Прибалтике, Поволжье, Беларуси, Республике Коми, Ленинградской обл. и особенно в Западной Сибири. Их отличает низкая естественная влажность из-за высокого коэффициента фильтрации (до 10 – 15 м/сут., а иногда и выше), практическое отсутствие в их составе пылеватых и глинистых частиц, высокая однородность их песчаных частиц по размеру, окатанность этих частиц по форме до почти гладких шариков.

Вследствие этого они обладают очень низкой прочностью, особенно на сдвиг. Проезжаемость по ним колесных строительных машин и транспорта практически нулевая. Попытки уплотнять их пневмокатками или тяжелыми прицепными виброкатками (8 – 12 т) не обеспечивали требуемого качества. Для ряда серьезных дорожных строек в Западной Сибири, Белоруссии и Ленинградской обл. институт СоюздорНИИ (фи-



лиал в Санкт-Петербурге) вынужден был в свое время обосновывать снижение минимально требуемой нормы на их уплотнение с 0,95 и 0,98 до 0,92–0,93 и 0,95.

Однако терпеливое изучение свойств и поведения таких песков в полевых и лабораторных условиях показало, что при незначительных и даже очень слабых вибрациях, сотрясениях и ударах они довольно легко, быстро и весьма качественно уплотняются (до степени 1,02–1,03).

Наблюдения в течение 10 лет за поведением насыпей из одноразмерных песков в Ленинградской обл. (федеральная автодорога «Кола» Санкт-Петербург–Мурманск) выявили непрерывный, но затухающий рост осадки и качества их уплотнения за счет именно слабых сотрясений и вибраций от проходящего по дороге транспорта (табл. 2). Из этого был сделан важный вывод для практики о том, что статические пневмоколесные или средние и тяжелые вибрационные средства укатки малопригодны и совсем неэффективны на одноразмерных песках. Лучше всего их уплотнять легкими по весу и крупными по размерам виброкатками и виброплитами со слабыми силовыми воздействиями по особой технологии. Не исключается также применение статического решетчатого катка с прерывистой поверхностью его вальца. На практике толщина хорошо уплотненного слоя такого песка подобным прицепным вариантом катка (вес 25–30 т, ширина 2,3 м и диаметр вальца 2 м) доходила до 50–55 см.

В реальной дорожной действительности иногда возникают такие нестандартные и необычные проблемы и задачи, в частности, по уплотнению грунтов особых разновидностей и состояний, что решение их кажется маловероятным или вообще невозможным.

Одна из таких очередных проблем возникла на севере Тюменской обл. России в зоне транспортного освоения нефтегазовых территорий. Здесь строительство земляного полотна под укладку сборного покрытия из железобетонных плит выполнялось из местных почти вечномерзлых грунтов, разрабатываемых зимой в притрассовых карьерах (островки между болотами) преимущественно взрывным способом.

Отсыпанное земляное полотно из крупных и частично мелких кусков взорванной мерзлоты, невзирая на существенную его пустотность и пористость, вело себя в холодное время года удовлетворительно с вполне приемлемой для движения транспорта ровностью плитного покрытия. Но как только наступали весна и лето с круглосуточно греющим солнцем, начиналось таяние мерзлого грунта с неравномерными просадками насыпи, с нарушением общей

Таблица 2. Динамика изменения плотности и осадки насыпи из одноразмерного песка на автодороге «Кола».

Глубина слоя от поверхности покрытия, см	Степень уплотнения одноразмерного песка и осадка насыпи			
	После возведения земляного полотна	Через 2 года	Через 4 года	Через 10 лет
50	0,92	0,98	1,0	1,01-1,02
70	0,82	0,94	0,98	0,99
90	0,96	0,97	0,97	0,98
110	0,83	0,98	0,97	0,97
130	0,81	0,89	0,95	0,95
Среднее значение по слою 80 см	0,87	0,95	0,97	0,98
Осадка слоя насыпи 80 см	-	8,7 см (10,9%)	10,6 см (13,3%)	11,6 см (14,5%)

ее устойчивости и вертикальными смещениями и поворотами плит покрытия.

Предложенный вариант использования в карьере передвижных дробильно-сортировочных установок с целью получения мелких мерзлых комьев для заполнения пустот и пор между крупными кусками насыпи не был принят заказчиком из-за небольших размеров притрассовых карьеров и невозможности обеспечить безопасность и сохранность установок в момент взрыва мерзлоты.

Поэтому требовалось найти и предложить для Заполярья вариант такой технологии, при которой бы прочные комья мерзлоты измельчались путем статического раздавливания или динамического дробления прямо на насыпи с одновременным заполнением пор и пустот образующейся мелочью, т.е. технологию, сочетающую в себе две операции — измельчение (дробление) и уплотнение.

Решение такой задачи осложнялось двумя обстоятельствами. Во-первых, очень высокой прочностью на сжатие мерзлого грунта (до 100–120 кгс/см<sup>2</sup>) и, во-вторых, опасениями, что при чрезмерно высоких силовых воздействиях крупные комья просто погрузятся в нижнюю часть уплотняемой насыпи и окажутся вне зоны досягаемости для дробления.

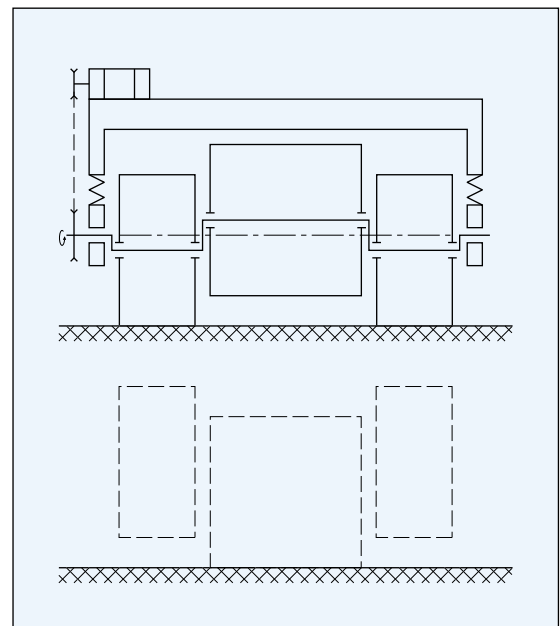
Было совершенно очевидным, что столь значительные контактные давления и соответствующие общие силы воздействия грунтоуплотняющей машины не могут быть реализованы статическим нагружением. У решавших эту задачу ученых был практический опыт создания и успешного применения совместно с дорожниками Латвии и Минтрансстрой СССР прицепных решетчатых статических катков весом 25–30 т на уплотнении связных

и несвязных грунтов с включениями отдельных менее прочных мерзлых комьев в Европейской части страны и не превышающих 25–30 % общего объема насыпи.

Анализ показал, что для искомой северной технологии прицепной решетчатый каток статического типа должен иметь значительный вес, превышающий 50–60 т, что было бы явным перебором для реальной практики. Поэтому нужно было использовать как раз динамические нагружения мощного виброкатка с решетчатым или ребристым вальцом. Но и в этом случае вес виброкатка оказывался достаточно большим, а центробежная сила вибровозбудителя выходила за рамки имевшихся в то время наиболее крупные модели виброкатков.

Найденное окончательное решение основывалось на том, что величина удельного импульсного воздействия вальца или плиты при ударном, частоударном или виброударном нагружении, или попросту величина удельного динамического давления на единицу площади поверхности контакта, определяется в основном двумя показателями — скоростью удара рабочего органа катка (вальца) и удель-

Рис. 6. Схема секционного виброударного катка с кинематическим возбудителем колебаний секций вальца.



ным статическим давлением на поверхность грунта в момент совершения удара. Управлять (уменьшать или увеличивать) величиной общего усилия воздействия или контактных динамических давлений можно путем изменения либо скорости удара (через амплитуду и частоту колебаний), либо контактного статического давления (через вес рабочего органа или площадь его контакта).

Поэтому для снижения общего веса предполагавшегося виброкатка и получения при этом значительных динамических контактных давлений его решетчатый валец был разделен на две равные по весу части или секции, каждая из которых за счет кинематического привода совершала поочередно свой удар по грунту с контактным статическим давлением в 2 раза большим, чем при ударе одним неразделенным вальцом (рис. 6).

Использование кинематического принципа вибровозбудителя (центральный вал катка с вальцами по типу кривошипного коленчатого) позволило сместить во времени начало контактов каждой секции или части вальца с грунтом так, что в момент начала этого контакта одной из секций другая выходит из этого контакта, становясь сразу же обычным статическим пригрузом для первой секции, что в 2 раза и увеличивает ее статическое давление. Кроме того, такой кинематический принцип позволяет технически достаточно про-

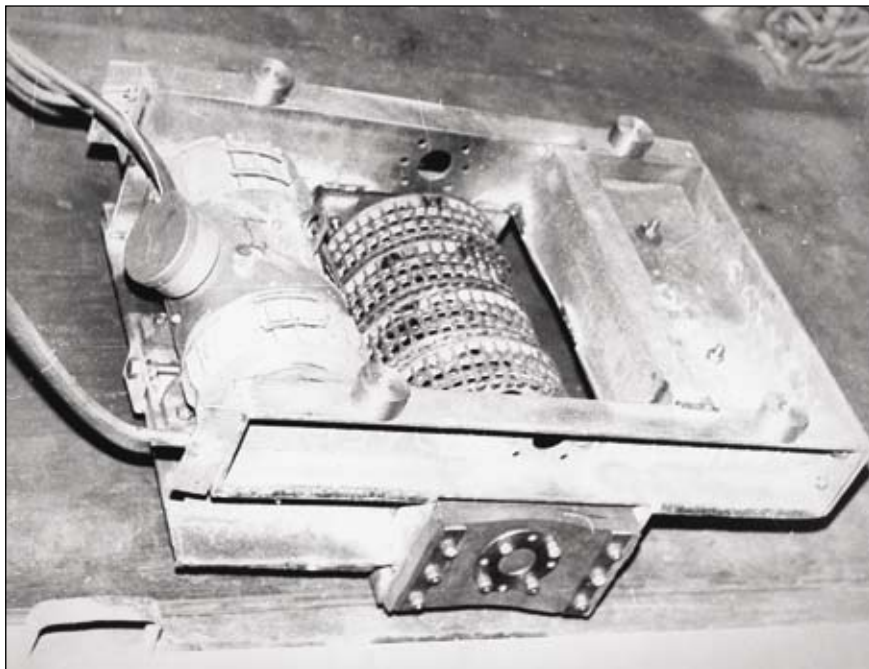


Рис. 7. Лабораторная модель виброкатка с решетчатым секционным вальцом

сто и легко регулировать эксцентриситет центрального вала вальца и скорость его вращения, т.е. изменять амплитуду и частоту принудительных колебаний обеих секций вальца.

Практическая проверка этой технологии и работоспособности предложенного устройства решетчатого (либо возможного гладковальцового, кулачкового, ребристого) виброкатка выполнялась в лаборатории путем моделирования (M1:10) прочности мерзлого грунта (готовилась смесь супеси с канифолью и парафином), размеров его кусков и обломков (до 60 мм) и самого катка (вес 130–400 кг с четырехсекционным решетчатым вальцом диаметром 230 мм и шириной 300 мм, рис. 7). В каждом из многочисленных экспериментов валец катка колебался с эксцентриситетом 1,5; 2,8 или 6,2 мм и частотой 16,26 или 36 Гц. После 4, 8, 12 или 16 проходов катка фиксировалось изменение гранулометрического состава отсыпки из кусков и обломков грунта в рабочем лотке (1500×320×150 мм).

Эти опыты подтвердили очень высокую функциональную эффективность технологии и самого катка. Они также рассеяли ожидаемые опасения о возможной нежелательной сегрегации крупных и мелких составляющих обломочного грунта при мощных вибродинамических воздействиях. По каким-то причинам наблюдалось как раз благоприятное перемещение частиц и кусков — вся мелочь уходила в нижнюю зону слоя отсыпки, а крупные куски «всплывали» кверху, где они и подвергались дроблению.

Следует заметить, что до сих пор в реальной практике разработки грунтоуплотняющей техники предложенный принцип создания эффективных вибродинамических усилий и давлений виброкат-



ками меньшего веса и габаритов нигде пока не использовался, хотя его достоинства и преимущества очевидны (эта разработка в свое время была признана изобретением).

Буквально для всей прежней и сегодняшней вибрационной грунтоуплотняющей техники используется один и тот же путь повышения ее эффективности — рост общего веса виброкатка и динамической центробежной силы, создаваемой вибровозбудителем внутри вальца. Это явно обременительно как для самого катка, так и для подрядчика — чем крупнее, тяжелее и мощнее каток, тем он дороже при покупке и эксплуатации.

Доказательством превалирования такой тенденции служит ряд последних разработок виброкатков, в том числе уже упоминавшихся, фирм Bomag, Orenstein and Koppel, Ingersoll-Rand ABG, Stavostroj и др. Дополнительно можно указать также на появление на рынке дорожной техники еще одной новинки фирмы Bomag — виброкатка BW226RC-4BVC со скалоломным вальцом. По своему функциональному назначению его можно признать крупным реальным аналогом российской модели виброударного решетчатого катка. Но этот аналог имеет уже вес 26,7 т и центробежную силу 53 тс! Куда же больше?

И, тем не менее, у всех вибрационных катков, предназначенных для уплотнения тех или иных видов и разновидностей грунтов и материалов, главным техническим параметром общепринято считать общий вес катка — у прицепных моделей без

тягача, у шарнирно-сочлененных вместе с од-



но о - сным пневмоколесным тягачом. Однако в функционально-технологическом плане в качестве наиболее важного или основного параметра нужно принимать вес вибрирующего вальца вместе со статическим его пригрузом, т.е. у прицепной модели главный и основной параметры совпадают, а у шарнирно-сочлененной основным параметром будет вес только его вибромодуля с пригрузом.

Этот основной функционально-технологический параметр с учетом специфики других параметров каждого виброкатка (размер вальца, амплитуда и частота колебаний, величина центробежной силы вибратора и т.п.) в конечном итоге и определяет его уплотняющую способность, т.е. возможность уплотнять тот или другой вид

или разновидность грунта до требуемого качества (степень 0,95; 0,98 и выше) в слое заданной толщины и, как правило, за 6–10 целесообразных проходов катка по следу своего вальца на оптимальной рабочей скорости в пределах 3–4 км/ч. Поэтому рекомендуемые в табл. 3 толщины уплотняемых слоев грунтов приведены в зависимости от общего веса прицепного или веса вибровальцового модуля шарнирно-сочлененного катка.

Хотя эти толщины являются ориентировочно средними для конкретных местных условий, но их достоверность базируется на обобщенных результатах многолетних и многочисленных научных исследований и практических испытаний виброкатков как в России, так и в других странах.

Таблица 3. Ориентировочные толщины оптимальных слоев уплотнения грунтов современными виброкатками.

Разновидность грунта, его состояние	Степень нормативного уплотнения	Оптимальная толщина уплотняемого слоя (см) виброкатком общим весом (прицепная модель) или весом вибровальцового модуля шарнирно-сочлененного образца (т)				Количество проходов катка	
		3-4	5-7	8-10	12-13		
Скально-крупнообломочный и валунно-галечный с несвязным заполнителем	0,95	-	-	75-85	110-120	8-10	
Песчано-гравийная смесь (ПГС), песок обычный, в том числе пылеватый	0,95	35-40	50-60	80-90	100-110	6-8	
	0,98	20-30	30-35	40-50	60-70	8-12	
Песок однородный при влажности (%):	≤4-5	0,95	30-35	40-45	-	-	4-6
		0,98	20-25	30-35	-	-	6-8
	≥6-7	0,95	40-45	55-60	70-75	-	4-6
		0,98	25-30	35-40	50-55	-	6-8
Супесь, в том числе пылеватая при оптимальной влажности	0,95	30-35	45-50	55-60	70-75	6-8	
	0,98	20-25	30-35	40-45	50-60	10-12	
Суглинок и глина песчаная при относительной влажности (в долях оптимальной)*:	0,95-1,05	0,95	-	20-25	25-30	35-40	8-10
		0,95	-	-	20-25	25-30	10-12
		0,95	-	-	-	-	-

\*) Только при использовании виброкатка с кулачками пэд-фут (бобышки)