

# ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПЛОТНЕНИЯ ВИБРОКАТКАМИ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА И СОСТОЯНИЯ

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

**Обязательное уплотнение грунта, щебня и асфальтобетона в дорожной отрасли является не только составной частью технологического процесса устройства земляного полотна, основания и покрытия, но и служит фактически главной операцией по обеспечению их прочности, устойчивости и долговечности**

Раньше (до 30-х годов прошедшего столетия) реализация указанных показателей грунтовых насыпей тоже осуществлялась уплотнением, но не механическим или искусственным путем, а за счет естественной самоосадки грунта под воздействием, в основном, его собственного веса и, частично, движения транспорта. Возведенную насыпь оставляли, как правило, на один-два, а в некоторых случаях и на три года, и только после этого устраивали основание и покрытие дороги.

Однако начавшаяся в те годы быстрая автомобилизация Европы и Америки потребовала ускоренного строительства обширной сети дорог и пересмотра методов их устройства. Суще-

ствовавшая тогда технология возведения земляного полотна не соответствовала возникшим новым задачам и стала тормозом в их решении. Поэтому появилась потребность в разработке научно-практических основ теории механического уплотнения земляных сооружений с учетом достижений механики грунтов, в создании новых эффективных грунтоуплотняющих средств.

Это в те годы стали изучать и учитывать физико-механические свойства грунтов, оценивать их уплотняемость с учетом granulометрического и влажностного состояния (метод Проктора, в России – метод стандартного уплотнения), были разработаны первые классификации грунтов и нормы на качество их

уплотнения, стали внедрять методы полевого и лабораторного контроля этого качества.

Основным грунтоуплотняющим средством до указанного периода являлся гладковальцовый статический каток прицепного или самоходного типа, пригодный только для прикатки и выравнивания приповерхностной зоны (до 15 см) отсыпанного слоя грунта, да еще ручная трамбовка, применявшаяся главным образом на уплотнении покрытий, при ремонте выбоин и для уплотнения обочин и откосов.

Эти простейшие и малоэффективные (с точки зрения качества, толщины обрабатываемого слоя и производительности) уплотняющие средства стали выте-

Уплотнение земляного полотна виброкатка-



снять такими новыми средствами, как пластинчатые, ребристые и кулачковые (вспомнили изобретение 1905 г. американского инженера Фитцджеральда) катки, трамбуемые плиты на экскаваторах, многолопковые трамбуемые машины на гусеничном тракторе и гладковальцовом катке, ручные взрыв-трамбовки («лягушки-попрыгушки») легкие (50-70 кг), средние (100-200 кг) и тяжелые (500 и 1000 кг).

В это же время появились первые грунтоуплотняющие вибрационные плиты, одна из которых фирмы «Лозенгаузен» (впоследствии фирма «Вибромакс») была достаточно крупной и тяжелой (24-25 т вместе с базовым гусеничным трактором). Ее виброплита площадью 7,5 м<sup>2</sup> располагалась между гусеницами, а двигатель мощностью 100 л.с. позволял вращать вибровозбудитель с частотой 1500 кол/мин (25 Гц) и перемещать машину со скоростью около 0,6-0,8 м/мин (не более 50 м/ч), обеспечивая производительность примерно 80-90 м<sup>2</sup>/ч или не более 50 м<sup>3</sup>/ч при толщине уплотняемого слоя около 0,5 м.

Более универсальным, т.е. способным уплотнять различные типы грунтов, в том числе связные, несвязные и смешанные, показал себя метод трамбования. К тому же при трамбовании легко и просто можно было регулировать силовое уплотняющее воздействие на грунт за счет изменения высоты падения трамбуемой плиты или трамбуемого молотка. Вследствие этих двух достоинств метод ударного уплотнения в те годы стал наиболее востребованным и распространенным. Поэтому количество трамбуемых машин и устройств множилось.

Уместно отметить, что и в России (тогда СССР) тоже понимали важность и необходимость перехода к механическому (искусственному) уплотнению дорожных материалов и налаживанию производства уплотняющей техники. В мае 1931 г. в мастерских г. Рыбинска (сегодня ЗАО «Раскат») был выпущен первый отечественный самоходный дорожный каток.

После завершения второй мировой войны совершенствование техники и технологии уплотнения грунтовых объектов пошло с не меньшим энтузиазмом и результативностью, чем в довоенное время. Появились прицепные, полуприцепные и самоходные пневмоколесные катки, ставшие на определенный период времени основным грунтоуплотняющим средством во многих странах мира. Их вес, в том числе единичных экземпляров, варьировался в довольно широких пределах - от 10 до 50-100 т, но большинство выпускавшихся моделей пневмокатков имело нагрузку на шину 3-5 т (вес 15-25 т) и толщину уплотняемого слоя, в зависимости от требуемого коэффициента уплотнения, от 20-25 см (связный грунт) до 35-40 см (несвязный и малосвязный) после 8-10 проходов по следу.

Одновременно с пневмокатками развивались, совершенствовались и приобретали все большую популярность, особенно в 50-е годы, вибрационные грунтоуплотняющие средства – виброплиты, гладковальцовые и кулачковые виброкатки. Причем, со временем на смену прицепным моделям виброкатков пришли более удобные и технологичные для выполнения линейных земляных работ самоходные шарнирно-сочлененные модели или, как их называли немцы, «вальцен-цуг» (тяги-толкай).

Каждая современная модель грунтоуплотняющего виброкатка, как правило, имеет два исполнения – с гладким и кулачковым вальцом. При этом некоторые фирмы изготавливают к одному и тому же одноосному пневмоколесному тягачу два отдельных взаимозаменяемых вальца, а другие предлагают покупателю катка вместо целого кулачкового вальца всего лишь «насадку-обечайку» с кулачками, легко и быстро закрепляемую поверх гладкого вальца. Есть также фирмы, разработавшие подобные гладковальцовые «насадки-обечайки» для монтажа поверх кулачкового вальца.

Следует особо отметить, что сами кулачки на виброкатках, особенно после

чала их практической эксплуатации в 1960 г., претерпели существенные изменения в своей геометрии и размерах, что благотворно отразилось на качестве и толщине уплотняемого слоя и снизило глубину взрыхления приповерхностной зоны грунта.

Если раньше кулачки «шипфут» были тонкими (опорная площадь 40-50 см<sup>2</sup>) и длинными (до 180-200 мм и более), то современные их аналоги «пэдфут» стали более короткими (высота в основном 100 мм, иногда 120-150 мм) и толстыми (опорная площадь около 135-140 см<sup>2</sup> с размером стороны квадрата или прямоугольника около 110-130 мм).

По закономерностям и зависимостям механики грунтов увеличение размеров и площади контактной поверхности кулачка способствует росту глубины эффективного деформирования грунта (для связного грунта она составляет 1,6-1,8 размера стороны опорной площадки кулачка). Поэтому слой уплотнения суглинка и глины виброкатком с кулачками «пэдфут» при создании надлежащих динамических давлений и с учетом 5-7 см глубины погружения кулачка в грунт стал составлять 25-28 см, что и подтверждают практические измерения. Такая толщина слоя уплотнения соизмерима с уплотняющей способностью пневмоколесных катков весом не менее 25-30 т.

Если к этому добавить существенно большую толщину уплотняемого слоя несвязных грунтов виброкатками и более высокую их эксплуатационную производительность, станет понятно, почему прицепные и полуприцепные пневмоколесные катки для уплотнения грунтов стали постепенно исчезать и сейчас практически не выпускаются или выпускаются редко и мало.

Таким образом, в современных условиях основным грунтоуплотняющим средством в дорожной отрасли подавляющего большинства стран мира стал самоходный одновальцовый виброкаток, шарнирно-сочлененный с одноосным пневмоколесным тягачом и имеющий

в качестве рабочего органа гладкий (для несвязных и малосвязных мелкозернистых и крупнозернистых грунтов, в том числе скально-крупнообломочных) или кулачковый валец (связные грунты).

Сегодня в мире имеется более 20 фирм, выпускающих около 200 моделей таких грунтоуплотняющих катков различных типоразмеров, отличающихся друг от друга общим весом (от 3,3-3,5 до 25,5-25,8 т), весом вибровальцового модуля (от 1,6-2 до 17-18 т) и своими габаритами. Есть также некоторое различие в устройстве вибровозбудителя, в параметрах вибрации (амплитуда, частота, центробежная сила) и в принципах их регулирования. И конечно перед дорожником могут возникать, как минимум, два вопроса – как правильно выбрать подходящую модель подобного катка и как наиболее эффективно с ее помощью осуществить качественное уплотнение грунта на конкретном практическом объекте и с наименьшими издержками.

При решении таких вопросов следует предварительно, но достаточно точно установить те преобладающие типы грунтов и их состояние (гранулометрический состав и влажность), для уплотнения которых подбирается виброкаток. Особенно, или в первую очередь, следует обратить внимание на наличие в составе грунта пылеватых (0,05-0,005 мм) и глинистых (меньше 0,005 мм) частиц, а

также на относительную его влажность (в долях оптимального ее значения). Эти данные дадут первые представления об уплотняемости грунта, возможном способе его уплотнения (чисто вибрационный или силовой виброударный) и позволят остановить свой выбор на виброкатке с гладким или кулачковым вальцом. Влажность грунта и количество пылеватых и глинистых частиц существенным образом влияют на прочностные и деформационные его свойства, а, следовательно, и на необходимую уплотняющую способность выбираемого катка, т.е. его способность обеспечить требуемый коэффициент уплотнения (0,95 или 0,98) в слое отсыпки грунта, задаваемом технологией устройства земляного полотна.

Большинство современных виброкатков работает в определенном виброударном режиме, выраженном в большей или меньшей степени в зависимости от их статического давления и вибрационных параметров. Поэтому уплотнение грунта, как правило, происходит под воздействием двух факторов:

1) вибраций (колебаний, сотрясений, шевелений), вызывающих снижение или даже разрушение сил внутреннего трения и небольшого сцепления и зацепления между частицами грунта и создающих благоприятные условия для эффективного смещения и более плотной переупаковки этих частиц под воздействием

собственного веса и внешних сил;

2) динамических сжимающих и сдвигающих усилий и напряжений, создаваемых в грунте кратковременными, но частоударными нагрузками.

В уплотнении сыпучих несвязных грунтов основная роль принадлежит первому фактору, второй служит лишь положительным дополнением к нему. В связных грунтах, в которых силы внутреннего трения незначительны, а физико-механические, электрохимические и водно-коллоидные сцепления между мелкими частицами существенно выше и являются преобладающими, главным действующим фактором служит сила давления или напряжения сжатия и сдвига, а роль первого фактора становится второстепенной.

Исследованиями российских специалистов по механике и динамике грунтов в свое время (1962-64 гг.) было показано, что уплотнение сухих или почти сухих песков при отсутствии внешней их пригрузки начинается, как правило, при любых слабых вибрациях с ускорениями колебаний не менее 0,2g (g – земное ускорение) и завершается практически полным их уплотнением при ускорениях около 1,2-1,5g.

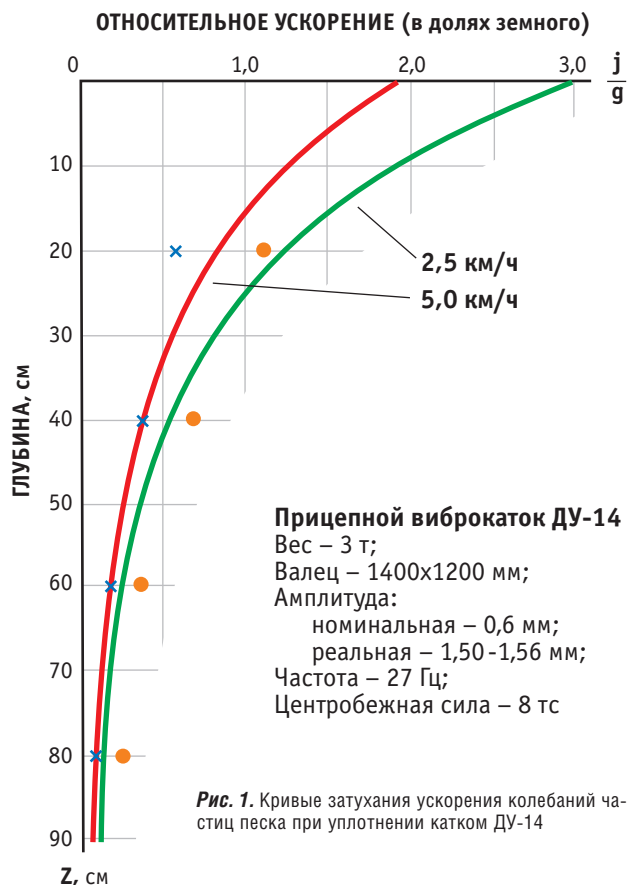
Для тех же оптимально влажных и водонасыщенных песков диапазон эффективных ускорений несколько выше – от 0,5g до 2g. При наличии внешней пригрузки с поверхности или при нахождении песка в зажатом состоянии внутри грунтового массива его уплотнение начинается лишь с некоторого критического ускорения, равного 0,3-0,4g, с превышением которого процесс уплотнения развивается более интенсивно.

Примерно в то же время и почти точно такие же результаты на песках и гравии были получены в экспериментах фирмы «Дупарас», в которых с помощью лопастной крыльчатки было показано также, что сопротивление сдвигу этих материалов в момент их вибрирования может снижаться на 80-98%.

На основании таких данных можно построить две кривые – изменения крити-



Гладковальцовый виброкаток CA 402 фирмы DYNAPAC



ческих ускорений и затухания действующих от виброплиты или вибровальца ускорений грунтовых частиц с удалением от поверхности, где располагается источник колебаний. Точка пересечения этих кривых даст интересующую глубину эффективного уплотнения песка или гравия.

На рис. 1 показаны две кривые затухания ускорений колебаний частиц песка, зафиксированные специальными датчиками, при его уплотнении прицепным виброкатком ДУ-14 (Д-480) на двух рабочих скоростях. Если принять для песка внутри грунтового массива критическое ускорение 0,4-0,5g, то из графика вытекает, что толщина прорабатываемого слоя таким легким виброкатком составляет 35-45 см, что неоднократно подтверждено полевым контролем плотности.

Недостаточно или плохо уплотненные сыпучие несвязные мелкозернистые (песчаные, песчано-гравийные) и даже крупнозернистые (скально-крупнообломочные, гравийно-галечниковые) грунты, уложенные в земляное полотно транспортными сооружениями, до-

вольно быстро обнаруживают свою низкую прочность и устойчивость в условиях различного рода сотрясений, ударов, вибраций, которые могут возникать при движении тяжелого грузового автомобильного и железнодорожного транспорта, при работе всевозможных ударных и вибрационных машин по забивке, например, свай или виброуплотнению слоев дорожных одежд и т.п.

Частота вертикальных колебаний элементов дорожной конструкции при проезде грузового автомобиля на скорости 40-80 км/ч составляет 7-17 Гц, а одиночный удар трамбующей плиты весом 1-2 т по поверхности грунтовой насыпи возбуждает в ней как вертикальные с частотой от 7-10 до 20-23 Гц, так и горизонтальные колебания с частотой, составляющей около 60% от вертикальных.

В недостаточно устойчивых и чувствительных к вибрациям и сотрясениям грунтах такие колебания способны вызывать деформации и заметные осадки. Поэтому не только целесообразно, но и необходимо их уплотнять вибрационными или любыми другими динамическими воздействиями, создавая в них колебания, сотрясения и шевеление частиц. И совершенно бессмысленно уплотнять такие грунты статической укаткой, что довольно часто можно было наблюдать на серьезных и крупных автодорожных, железнодорожных и даже гидротехнических объектах.

Многочисленные попытки уплотнить пневмоколесными катками маловлажные однозернистые пески в насыпях железных и автомобильных дорог и аэродромов в нефтегазоносных районах Западной Сибири, на белорусском участке автодороги Брест-Минск-Москва и на других объектах, в Прибалтике, Поволжье, Республике Коми и Ленинградской обл. не давали требуемых результатов по плотности. Лишь появление на этих стройках прицепных виброкатков А-4, А-8 и А-12 помогло справиться с этой острой в свое время проблемой.

Еще нагляднее и острее

по своим неприятным последствиям может оказаться ситуация с уплотнением сыпучих крупнозернистых скально-крупнообломочных и гравийно-галечниковых грунтов. Устройство насыпей, в том числе высотой 3-5 м и даже более, из таких прочных и устойчивых к любым погодно-климатическим проявлениям грунтов с добросовестной их укаткой тяжелыми пневмоколесными катками (25 т), казалось бы, не давало серьезных поводов для беспокойства строителям, к примеру, одного из карельских участков федеральной автомобильной дороги «Кола» (Санкт-Петербург-Мурманск) или «знаменитой» в СССР железнодорожной Байкало-Амурской магистрали (БАМ).

Однако сразу же после пуска их в эксплуатацию стали развиваться неравномерные локальные просадки неправильно уплотненных насыпей, составившие в отдельных местах автодороги 30-40 см и искавшие до «пилообразного» с высокой аварийностью общий продольный профиль железнодорожного полотна БАМа.

Несмотря на схожесть общих свойств и поведения мелкозернистых и крупнозернистых сыпучих грунтов в насыпях, их динамическое уплотнение следует выполнять разными по весу, габаритам и интенсивности вибровоздействий вибрационными катками.

Однозернистые пески без примесей пыли и глины очень легко и быстро переупаковываются даже при незначительных сотрясениях и вибрациях, но они обладают незначительным сопротивлением сдвигу и очень низкой проходимостью по ним колесных или вальцовых машин. Поэтому уплотнять их следует легкими по весу и крупными по габаритам виброкатками и виброплитами с малым контактным статическим давлением и средним по интенсивности вибрационным воздействием, чтобы не снижалась толщина уплотняемого слоя.

Использование на однозернистых песках среднего А-8 (вес 8 т) и тяжелой А-12 (11,8 т) прицепных ви-



Кулачковый виброкаток 3412 фирмы HAMM

брокатков приводило к чрезмерному погружению вальца в насыпь и выдавливанию песка из-под катка с образованием перед ним не только вала грунта, но и перемещающейся за счет «бульдозерного эффекта» сдвиговой волны, заметной глазу на расстоянии до 0,5-1,0 м. В итоге приповерхностная зона насыпи на глубину до 15-20 см оказывалась разрыхленной, хотя плотность нижележащих слоев имела коэффициент уплотнения 0,95 и даже выше. У легких виброкатков разрыхленная приповерхностная зона может понизиться до 5-10 см.

Очевидно можно, а в ряде случаев и целесообразно, на таких однородных песках использовать средние и тяжелые виброкатки, но имеющие прерывистую поверхность вальца (кулачковую или решетчатую), что позволит улучшить проходимость катка, уменьшить сдвиг песка и снизить до 7-10 см разрыхляемую зону. Об этом свидетельствует успешный опыт автора по уплотнению насыпей из таких песков зимой и летом в Латвии и Ленинградской обл. даже статическим прицепным катком с решетчатым вальцом (вес 25 т), обеспечившим толщину уплотняемого до 0,95 слоя насыпи до 50-55 см, а также положительные результаты уплотнения этим же катком однородных барханых (мелких и полностью сухих) песков в Средней Азии.

Крупнозернистые скально-крупнообломочные и гравийно-галечниковые грунты, как показывает практический опыт, тоже успешно уплотняются виброкатками. Но вследствие того, что в их составе имеют-

ся, а иногда и преобладают крупные куски и глыбы размером до 1,0-1,5 м и более, сдвинуть, расшевелить и переместить которые, обеспечивая тем самым требуемые плотность и устойчивость всей насыпи, не так-то легко и просто.

Поэтому на таких грунтах должны использоваться крупные, тяжелые, прочные и с достаточной интенсивностью виброударного воздействия гладковальцовые виброкатки весом прицепной модели или вибровальцового модуля у шарнирно-сочлененного варианта не менее 12-13 т.

Толщина прорабатываемого слоя таких грунтов подобными катками может достигать 1-2 м. Практикуются же такого рода отсыпки в основном на крупных гидротехнических и аэродромных стройках. В дорожной отрасли они встречаются редко, и поэтому дорожникам нет особой надобности и целесообразности приобретать гладковальцовые катки с весом рабочего вибровальцового модуля тяжелее 12-13 т.

Куда важнее и серьезнее для российской дорожной отрасли является задача уплотнения мелкозернистых смешанных (песок с тем или иным количеством примесей пыли и глины), просто пылеватых и связных грунтов, чаще встречающихся в повседневной практике, чем скально-крупнообломочные и их разновидности.

Особенно много хлопот и неприятностей возникает у подрядчиков с пылеватыми песками и с чисто пылеватыми грунтами, довольно широко распространенными во многих местах России.

Специфика этих непластичных малосвязных грунтов состоит в том, что при высокой их влажности, а таким переувлажнением «грешит» в первую очередь Северо-Западный регион, под влиянием движения автотранспорта или уплотняющего воздействия виброкатков они переходят в «разжиженное» состояние вследствие низкой их фильтрационной способности и возникающего повышения порового давления при избытке влаги.

С понижением влажности до оптимальной такие грунты сравнительно легко и хо-

рошо уплотняются средними и тяжелыми гладковальцовыми виброкатками с весом вибровальцового модуля 8-13 т, для которых уплотняемые до требуемых норм слой отсыпки могут составлять 50-80 см (в переувлажненном состоянии толщины слоев понижаются до 30-60 см).

Если в песчаных и пылеватых грунтах появляются заметное количество глинистых примесей (не менее 8-10%), они начинают проявлять значительную связность и пластичность и по своей способности к уплотнению приближаются к глинистым грунтам, которые совсем плохо или вообще не поддаются деформированию чисто вибрационным способом.

Исследованиями профессора Хархуты Н. Я. показано, что при уплотнении таким способом практически чистых песков (примесей пыли и глины менее 1%) оптимальная толщина слоя, уплотняемого до коэффициента 0,95, может доходить до 180-200% от минимального размера контактной площадки рабочего органа вибромашины (виброплита, вибровалец с достаточными контактными статическими давлениями). С повышением содержания в песке указанных частиц до 4-6% оптимальная толщина прорабатываемого слоя сокращается в 2,5-3 раза, а при 8-10% и более достичь коэффициента уплотнения 0,95 вообще невозможно.

Очевидно, в таких случаях целесообразно или даже необходимо переходить на силовой способ уплотнения, т.е. на использование современных тяжелых виброкатков, работающих в виброударном режиме и способных создавать в 2-3 раза более высокие давления, чем, например, статические пневмоколесные катки с давлением на грунт 6-8 кгс/см<sup>2</sup>.

Чтобы происходило ожидаемое силовое деформирование и соответствующее уплотнение грунта, создаваемые рабочим органом уплотняющей машины статические или динамические давления должны быть как можно ближе к пределам прочности грунта на сжатие и сдвиг (около 90-95%), но и

не превышали его. Иначе на контактной поверхности появятся трещины сдвигов, выпоры и другие следы разрушения грунта, которые к тому же будут ухудшать условия передачи в нижележащие слои насыпи необходимых для уплотнения давлений.

Прочность связных грунтов зависит от четырех факторов, три из которых относятся непосредственно к самим грунтам (гранулометрический состав, влажность и плотность), а четвертый (характер или динамичность прикладываемой нагрузки и оцениваемый скоростью изменения напряженного состояния грунта или, с некоторой неточностью, временем действия этой нагрузки) относится к воздействию уплотняющей машины и реологическим свойствам грунта.

С увеличением содержания глинистых частиц прочность грунта возрастает до 1,5-2 раз по сравнению с песчаными грунтами. Реальная влажность связных грунтов является очень важным показателем, влияющим не только на прочность, но и на их уплотняемость. Наилучшим образом такие грунты уплотняются при так называемом оптимальном содержании влаги. С превышением реальной влажностью этого оптимума снижается прочность грунта (до 2 раз) и существенным образом понижается предел и степень возможного его уплотнения. Наоборот, с уменьшением влажности ниже оптимального уровня предел прочности резко возрастает (при 85% от оптимальной – в 1,5 раза, а при 75% - до 2 раз). Вот почему так трудно уплотнять маловлажные связные грунты.

По мере уплотнения грунта растет и его прочность. В частности, по достижении в насыпи коэффициента уплотнения 0,95 прочность связного грунта повышается в 1,5-1,6 раза, а при 1,0 – в 2,2-2,3 раза по сравнению с прочностью в начальный момент уплотнения (коэффициент уплотнения 0,80-0,85).

У глинистых грунтов, обладающих выраженными реологическими свойствами вследствие их вязкости, динамическая прочность на

сжатие может возрасти в 1,5-2 раза при времени их нагружения 20 мсек (0,020 сек), что соответствует частоте приложения виброударной нагрузки 25-30 Гц, а на сдвиг – даже до 2,5 раз по сравнению со статической прочностью. При этом динамический модуль деформации таких грунтов повышается до 3-5 раз и более.

Это свидетельствует о необходимости прикладывать к связным грунтам более высокие уплотняющие давления динамического характера, чем статического, чтобы получить одну и ту же деформацию и результат уплотнения. Очевидно поэтому некоторые связные грунты можно было эффективно уплотнять статическими давлениями 6-7 кгс/см<sup>2</sup> (пневмокати), а при переходе на их трамбование потребовались динамические давления порядка 15-20 кгс/см<sup>2</sup>.

Такое различие обусловлено разной скоростью изменения напряженного состояния связного грунта, при росте которой в 10 раз его прочность повышается в 1,5-1,6 раза, а в 100 раз – до 2,5 раз. У пневмоколесного катка скорость изменения контактных давлений во времени составляет 30-50 кгс/см<sup>2</sup>·сек, у трамбовок и виброкатков – около 3000-3500 кгс/см<sup>2</sup>·сек, т.е. повышение составляет 70-100 раз.

Для правильного назначения функциональных параметров виброкатков в момент их создания и для управления технологическим процессом выполнения этими виброкатками самой операции уплотнения связных и других разновидностей грунтов крайне важно и необходимо знать не только качественное влияние и тенденции изменения пределов прочности и модулей деформации этих грунтов в зависимости от их

грансостава, влажности, плотности и динамичности нагрузки, но и иметь конкретные значения этих показателей.

Такие ориентировочные данные по пределам прочности грунтов с коэффициентом плотности 0,95 при статическом и динамическом их нагружении установлены профессором Хархутой Н. Я. (табл. 1).

Уместно отметить, что с повышением плотности до 1,0 (100 %) динамическая прочность на сжатие некоторых высокосвязных глиен оптимальной влажности возрастает до 35-38 кгс/см<sup>2</sup>. При снижении же влажности до 80% от оптимальной, что может быть в теплых, жарких или засушливых местах ряда стран, их прочность может достигать еще больших значений – 35-45 кгс/см<sup>2</sup> (плотность 95%) и даже 60-70 кгс/см<sup>2</sup> (100%).

Конечно, уплотнять подобные высокопрочные грунты можно только тяжелыми виброударными кулачковыми катками. Контактных давлений гладковальцовых виброкатков даже для обычных суглинков оптимальной влажности будет явно недостаточно, чтобы получить требуемый нормативами результат уплотнения.

До недавнего времени оценка или расчет контактных давлений под гладким или кулачковым вальцом статического и вибрационного катка производились очень упрощенно и приближенно по косвенным и не очень обоснованным показателям и критериям.

На основе теории колебаний, теории упругости, теоретической механики, механики и динамики грунтов, теории размерностей и подобия, теории проходимости колесных машин и изучения взаимодействия вальцового штампа с поверхностью

Таблица 1

Пределы прочности (кгс/см<sup>2</sup>) грунтов с коэффициентом уплотнения 0,95 и оптимальной влажностью

Способ уплотнения	Тип грунта			
	несвязный и малосвязный (песчаный, супесчаный, в т.ч. пылеватый)	среднесвязный (суглинок легкий)	связный (суглинок тяжелый)	высокосвязный (глина)
Статический (пневмокатоков)	3-4	5-6	7-8	9-12
Динамический (виброкатков, трамбовка)	5-7	9-12	14-18	20-25



Кулачковый виброкоток фирмы BOMAG

уплотняемого линейно-деформируемого слоя асфальтобетонной смеси, щебеночного основания и грунта земляного полотна получена универсальная и довольно простая аналитическая зависимость для определения контактных давлений под любым рабочим органом катка колесного или вальцового типа (пневмошинное колесо, гладкий жесткий, обрезиненный, кулачковый, решетчатый или ребристый валец):

Более подробная методо-

$$\sigma_o = \frac{3}{2} p_k \sqrt[3]{\frac{E_o}{h}} \leq \sigma_p \quad (1)$$

где:

$$p_k = \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 (\text{или } R_o^2)}{B^2 D}} \quad (2)$$

- $\sigma_o$  – максимальное статическое или динамическое давление вальца;
- $Q_B$  – весовая нагрузка вальцового модуля;
- $R_o$  – общая сила воздействия вальца при вибродинамическом его нагружении;  $R_o = Q_B K_d$
- $E_o$  – статический или динамический модуль деформации уплотняемого материала;
- $h$  – толщина уплотняемого слоя материала;
- $B, D$  – ширина и диаметр вальца;
- $\sigma_p$  – предел прочности (разрушения) уплотняемого материала;
- $K_d$  – коэффициент динамичности

логия и пояснения к ней изложены в аналогичном сборнике-каталоге «Дорожная техника и технология» за 2003 г. Здесь уместно лишь указать, что в отличие от гладковальцовых катков при определении полной осадки поверхности материала  $\sigma_o$ , максимальной динамической силы  $R_o$  и контактного давления  $\sigma_o$  у кулачковых, решетчатых и ребристых катков используется эквивалентная гладковальцовому ширина их вальцов, а у пневмоколесных и обрезиненных катков – эквивалентный диаметр.

В табл. 2 представлены результаты расчетов по указанной методике и аналитическим зависимостям основных показателей динамического воздействия, в том числе контактных давлений, гладковальцовых и кулачковых виброкотков ряда фирм с целью анализа их уплотняющей способности при отсыпке в земляное полотно одного из возможных типов мелкозернистых грунтов слоем 60 см (в рыхлом и плотном состоянии коэффициент уплотнения равен соответственно 0,85-0,87 и 0,95-0,96, модуль деформации  $E_o = 60$  и 240 кгс/см<sup>2</sup>, и значение реальной амплитуды колебаний вальца тоже соответственно  $a = A_o/A_u = 1,1$  и 2,0), т.е. все катки имеют одинаковые условия для проявления своих уплотняющих способностей, что придает результатам расчета и их сравнения необходимую корректность.

ЗАО «ВАД» имеет в своем парке целую гамму исправно и эффективно работающих грунтоуплотняющих гладковальцовых виброкотков фирмы «Дупарас», начиная от самого легкого (СА152D) и кончая самым тяжелым (СА602D). Поэтому было полезно получить расчетные данные для одного из таких катков (СА302D) и сравнить с данными аналогичных и близких по весу трех моделей фирмы Hamt, созданных по своеобразному принципу (за счет увеличения пригруза колеблющегося вальца без изменения его веса и других показателей вибрации).

В табл. 2 представлены также некоторые наиболее крупные виброкотки двух

фирм (Bomag, Orenstein and Koppel), в том числе кулачковые их аналоги, и модели широко использовавшихся ранее на автодорожных и гидротехнических стройках СССР (России) прицепных виброкотков (А-8, А-12, ПВК-70ЭА).

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать некоторые выводы и заключения, в том числе практического плана:

1 создаваемые гладковальцовыми виброкотками, в том числе среднего веса (СА302D, Hamt 3412 и 3414), динамические контактные давления заметно превосходят (на подуплотненных грунтах в 2 раза) давления тяжелых статических катков (пневмоколесного типа весом 25т и более), поэтому они способны достаточно эффективно и с приемлемой для дорожников толщиной слоя уплотнить несвязные, малосвязные и легкие связные грунты;

2 кулачковые виброкотки, в том числе наиболее крупные и тяжелые, по сравнению со своими гладковальцовыми аналогами, могут создавать в 3 раза более высокие контактные давления (до 45-55 кгс/см<sup>2</sup>), и поэтому они пригодны для успешного уплотнения высокосвязных и достаточно прочных тяжелых суглинков и глин, включая их разновидности с пониженной влажностью; анализ возможностей этих виброкотков по контактным давлениям показывает, что есть определенные предпосылки несколько повысить эти давления и увеличить толщину слоев связных грунтов, уплотняемых крупными и тяжелыми их моделями, до 35-40 см вместо сегодняшних 25-30 см;

3 опыт фирмы «Hamt» по созданию трех различных виброкотков (3412, 3414 и 3516) с одинаковыми вибрационными параметрами (масса колеблющегося вальца, амплитуда, частота, центробежная сила) и разной общей массой вибровальцового модуля за счет пригруза рамы следует признать интересным и полезным, но не на все 100% и прежде всего с точки зрения незначительной разницы создаваемых вальцами

катков динамических давлений, например, у 3412 и 3516; но зато у 3516 время пауз между импульсами нагружения сокращается на 25-30%, увеличивая время контакта вальца с грунтом и повышая КПД передачи энергии последнему, что способствует прониканию в глубь грунта более высокой плотности;

на основе сравнения виброкатков по их параметрам или даже по результатам практических испытаний некорректно, да и вряд ли справедливо, утверждать, что этот каток вообще лучше, а другой – плохой; каждая модель может быть хуже или, наоборот, хороша и пригодна для конкретных своих условий применения (тип и состояние грунта, толщина уплотняемого слоя); приходится только сожалеть, что до сих пор не появились образцы виброкатков с более универсальными и регулируемые параметрами уплотнения для использования в более широком диапазоне типов и состояний грунтов и

толщин отсыпаемых слоев, что могло бы избавить дорожника от необходимости приобретать набор грунтоуплотняющих средств разных типов по весу, габаритам и уплотняющей способности.

Некоторые из сделанных выводов могут показаться не такими уж новыми и даже уже известными из практического опыта. В том числе, и о бесполезности применения гладковальцовых виброкатков на уплотнении связных грунтов, особенно маловлажных.

Автор в свое время отрабатывал на специальном полигоне в Таджикистане технологию уплотнения лангарского суглинки, укладываемого в тело одной из самых высоких плотин (300 м) теперь уже действующей Нурекской ГЭС. В состав суглинки входили от 1 до 11% песчаных, 77-85% пылеватых и 12-14% глинистых частиц, число пластичности было 10-14, оптимальная влажность – около 15,3-15,5%, естественная влажность составляла

всего 7-9%, т.е. не превышала 0,6 от оптимального значения.

Уплотнение суглинки производилось разными катками, в том числе специально созданным для этой стройки очень крупным прицепным виброкатком ПВК-70ЭА (22т, см. табл. 2), имевшим достаточно высокие вибрационные параметры (амплитуда 2,6 и 3,2 мм, частота 17 и 25 Гц, центробежная сила 53 и 75 тс). Однако из-за низкой влажности грунта требуемое уплотнение 0,95 этим тяжелым катком удалось получить только в слое не более 19 см.

Более эффективно и успешно этим катком, а также А-8 и А-12 выполнялось уплотнение сыпучих гравийно-галечниковых материалов, укладываемых слоями до 1,0-1,5 м.

По измеренным напряжениям специальными датчиками, помещаемыми в насыпь на различную глубину, построена кривая затухания этих динамических давлений по глубине грунта, уплотняемого тремя

Таблица 2

Фирма, модель виброкатка, тип вальца	Режим вибрации	Грунт рыхлый, $K_u = 0,85-0,87$ $h = 60 \text{ см}; E_0 = 60 \text{ кгс/см}^2$ $a = 1,1$				Грунт плотный, $K_u = 0,95-0,96$ $h = 60 \text{ см}; E_0 = 240 \text{ кгс/см}^2$ $a = 2$			
		$K_d$	$R_{0r}$ тс	$p_{kd}$ кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_{од}$ кгс/см <sup>2</sup>	$K_d$	$R_{0r}$ тс	$p_{kd}$ кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_{од}$ кгс/см <sup>2</sup>
Дупарас, СА 302Д, гладкий, $Q_{ам} = 8,1\text{т}$ $P_0 = 14,6/24,9 \text{ тс}$	слабый	1,85	15,0	3,17	4,8	2,37	19,2	3,74	8,9
	сильный	2,12	17,2	3,48	5,2	3,11	25,2	4,50	10,7
Намм 3412, гладкий, $Q_{ам} = 6,7\text{т}$ $P_0 = 21,5/25,6 \text{ тс}$	слабый	2,45	16,4	3,40	5,1	3,88	26,0	4,60	11,0
	сильный	3,0	20,1	3,90	5,9	4,80	32,1	5,30	12,6
Намм 3414, гладкий, $Q_{ам} = 8,2\text{т}$ $P_0 = 21,5/25,6 \text{ тс}$	слабый	1,94	15,9	3,32	5,0	3,42	28,0	4,86	11,6
	сильный	2,13	17,5	3,54	5,3	3,63	29,8	5,05	12,0
Намм 3516, гладкий, $Q_{ам} = 9,3\text{т}$ $P_0 = 21,5/25,6 \text{ тс}$	слабый	2,16	20,1	3,87	5,8	2,58	24,0	4,36	10,4
	сильный	2,32	21,6	4,06	6,1	3,02	28,1	4,84	11,5
Vomag, BW 225D-3, гладкий, $Q_{ам} = 17,04\text{т}$ $P_0 = 18,2/33,0 \text{ тс}$	слабый	1,43	24,4	4,24	6,4	1,78	30,3	4,92	11,7
	сильный	1,69	28,6	4,72	7,1	2,02	34,4	5,36	12,8
Vomag, BW 225PD-3, кулачковый, $Q_{ам} = 16,44\text{т}$ $P_0 = 18,2/33,0 \text{ тс}$	слабый	1,34	22,0	12,46	18,7	1,82	29,9	15,26	36,4
	сильный	1,75	28,8	14,90	22,4	2,21	36,3	17,36	41,4
Orenstein and Koppel, SR25S, гладкий, $Q_{ам} = 17,57\text{т}$ $P_0 = 34/46 \text{ тс}$	слабый	1,80	31,8	5,0	7,5	2,31	40,6	5,76	13,7
	сильный	2,07	36,4	5,37	8,1	2,99	52,5	6,86	16,4
Orenstein and Koppel, SR25D, кулачковый, $Q_{ам} = 17,64\text{т}$ $P_0 = 34/46 \text{ тс}$	слабый	1,74	30,7	15,43	23,1	2,22	39,2	18,16	43,3
	сильный	2,14	37,7	17,73	26,6	3,0	52,9	22,21	53,0
Германия, А-8, гладкий, $Q_{ам} = 8\text{т}$ $P_0 = 18 \text{ тс}$	один	1,75	14,0	3,14	4,7	3,23	25,8	4,71	11,2
Германия, А-12, гладкий, $Q_{ам} = 11,8\text{т}$ $P_0 = 36 \text{ тс}$	один	2,07	24,4	4,21	6,3	3,20	37,7	5,60	13,4
Россия, ПВК-70ЭА, гладкий, $Q_{ам} = 22\text{т}$ $P_0 = 53/75 \text{ тс}$	слабый	1,82	40,1	4,86	7,3	2,58	56,7	6,11	14,6
	сильный	2,52	55,5	6,01	9,1	4,32	95,1	8,64	20,6



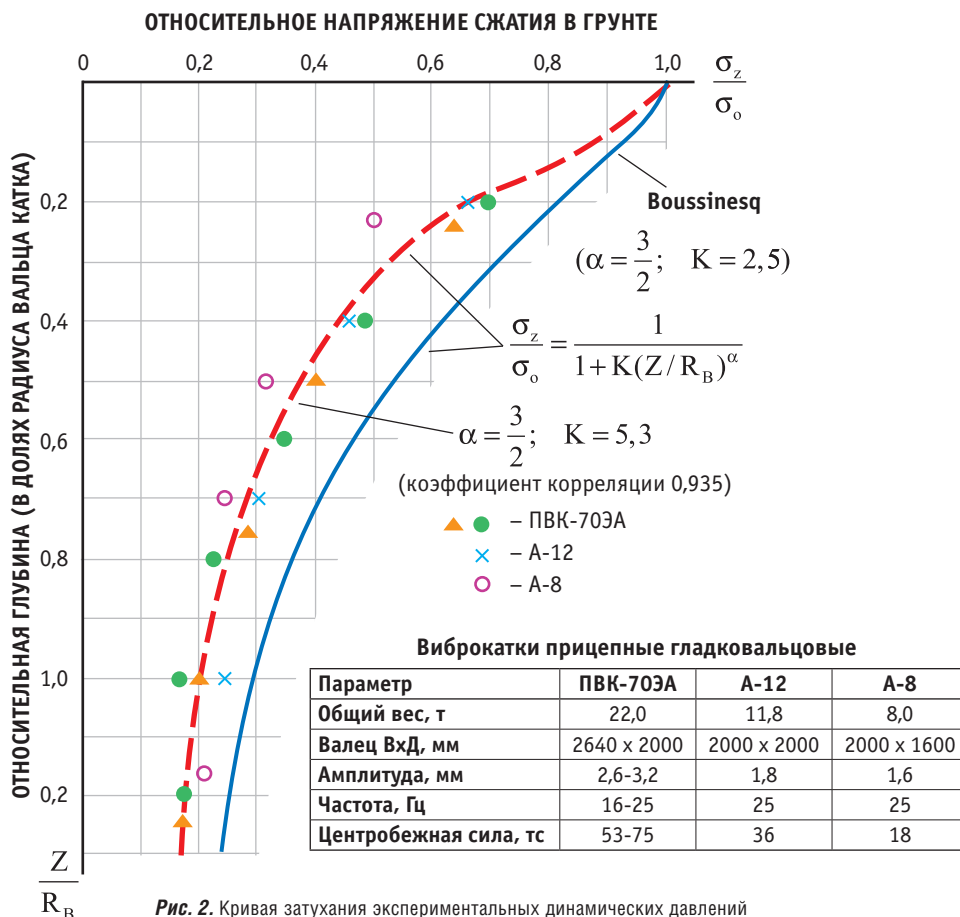


Рис. 2. Кривая затухания экспериментальных динамических давлений

указанными вибротокками (рис. 2).

Несмотря на довольно значительные различия в общем весе, габаритах, параметрах вибрации и контактных давлениях (различия доходило до 2-2,5 раз) значения экспериментальных давлений в грунте (в относительных единицах) оказались близкими и подчиняющимися одной закономерности (пунктирная кривая на графике рис. 2) и аналитической зависимости, показанной на том же графике.

Интересно, что точно такая же зависимость присуща экспериментальным кривым затухания напряжений при чисто ударном нагружении грунтового массива (трамбующая плита диаметром 1 м и весом 0,5-2,0т). И в том и другом случае показатель степени  $\lambda$  остается неизменным и равным или близким 3/2.

Изменяется только коэффициент  $K$  в соответствии с характером или «остротой» (агрессивностью) динамической нагрузки от 3,5 до 10. При более «остром» нагружении грунта он больше, при «вялом» – меньше.

Этот коэффициент  $K$  служит как бы «регулирующим» степени затухания напряжений по глубине грунта. При высоком его значении напряжения быстрее снижаются, с удалением от поверхности нагружения и толщина прорабатываемого слоя грунта уменьшается. С уменьшением  $K$  характер затухания становится более плавным и приближающимся к кривой затухания статических давлений (на рис. 2 у Буссинэ  $\lambda = 3/2$  и  $K = 2,5$ ). В этом случае в глубь грунта как бы «проникают» более высокие давления и толщина слоя уплотнения возрастает.

Характер импульсных

воздействий виброток не очень сильно варьируется, и можно предположить, что значения  $K$  будут в пределах 5-6. А при известном и близком к стабильному характере затухания относительных динамических давлений под вибротокками и определенных значениях необходимых относительных напряжений (в долях предела прочности грунта) внутри грунтовой насыпи можно, с достаточной долей вероятности, устанавливать толщину слоя, в котором действующими там давлениями будет обеспечена реализация коэффициента уплотнения, например, 0,95 или 0,98.

Практикой, пробными уплотнениями и многочисленными исследованиями ориентировочные значения таких внутригрунтовых давлений установлены и представлены в табл. 3.

Существует также упрощенный прием определения толщины уплотняемого слоя гладковальцовым вибротком, по которому каждая тонна веса вибротоккового модуля способна обеспечить примерно следующую толщину слоя (при оптимальной влажности грунта и нужных параметрах вибротокка):

- 1 пески крупные, средние, ПГС – 9-10 см;
- 1 пески мелкие, в том числе с пылью – 6-7 см;
- 1 супеси легкие и средние – 4-5 см;
- 1 легкие суглинки – 2-3 см.

**Заключение. Современные гладковальцовые и кулачковые вибротокки являются эффективными грунтоуплотняющими средствами, способными обеспечить требуемое качество возводимого земляного полотна. Задача дорожника состоит в грамотном осмыслении возможностей и особенностей этих средств для правильного ориентирования при их выборе и практическом применении.**

Таблица 3

Требуемый коэффициент уплотнения	0,90	0,95	0,98	1,0
Требуемое относительное давление (в долях предела прочности грунта) внутри уплотняемого грунтового массива	0,10-0,15	0,20-0,25	0,40-0,45	0,65-0,70