



«Интеллектуальное уплотнение»: дерзкий замысел или объективная реальность?

Краткое (хотя и не совсем полное) определение «интеллектуального уплотнения» (IC) относится к вибрационным дорожным каткам, в которых выходная мощность регулируется автоматически, что исключает «недоуплотнение» и «переуплотнение» материала. Таким образом, теоретически IC позволяет получить точные и стабильные результаты по всей зоне производства работ, обеспечивая подробное документирование качества уплотнения.

Специалисты уверяют, что система IC принимается в качестве проверенной технологии на ряде западноевропейских рынков. В таком случае разве нет оснований полагать, что пользователи катков уже выстраиваются в длинную очередь за такими машинами? Пока длинных очередей не наблюдается. Однако спешим добавить, что их отсутствие в данный момент не бросает тень на саму технологию и на машины, которые уже работают или скоро появятся на строительных площадках.

Сейчас *фирмы Ammann, Bomag и Dynapac имеют машины с системой IC*, готовые к работе на

земляном полотне и щебёнке, причём у первых двух фирм есть такие модели и для асфальта. *Фирма Caterpillar* планирует официально представить грунтовой каток с системой IC в 2007 г., а асфальтовую модель — примерно через год. *Фирма Sakai* намеревается выйти на североамериканский рынок с катками IC обоих типов в 2008 г., а *фирма Dynapac* разрабатывает асфальтовую машину, которая скоро поступит в продажу в Европу, а затем и на мировой рынок.

Машины, оснащённые системой IC, на 20–30% дороже обычных, что может представлять проблему для некоторых пользователей, а низкий объём их сбыта в настоящее время является скорее результатом недоверия рынка к этой технологии. Наверное, дело в том, что *потенциальные преимущества системы IC велики и те, кому необходимо более точное и более стабильное уплотнение, хотят убедиться, что эта система способна обеспечить то, что обещает.*

Среди тех, кому нужны факты, можно назвать Федеральное управление шоссейных дорог США и растущее число Управлений транспорта штатов, в частности штата Миннесота. У руководителей Федерального уп-

равления шоссейных дорог в настоящее время имеется 160-страничный отчёт о проведённом исследовании, называемый «Интеллектуальное уплотнение: стратегический план», в котором подробно описана эта технология, указаны её потенциальные преимущества, определены задачи дальнейших исследований и представлен план внедрения в общегосударственном масштабе.

Управление транспорта штата Миннесота провело в 2004–2005 гг. широкие испытания грунтовых катков с системой IC компаний Bomag (рис. 1), Ammann и Caterpillar на полигонах штата и продолжает исследования в этой области.

Что такое «интеллект»?

Несмотря на большую массу и мощность, конструкции грунтовых и асфальтовых виброкатков уже несколько десятилетий становятся все «умнее». Например, в середине 70-х годов прошлого века шведская машиностроительная фирма *Geodynamik* разработала *устройство Compactometer* (поставляемое в более «интеллектуальном» варианте), позволяющее измерять движение вальца и обрабатывать генерируемые сигналы для непрерывного получения относительного значения уровня уплотнения или жёсткости материала (жёсткость в широком смысле как показатель способности материала сопротивляться деформации под нагрузкой). Этот процесс известен в Европе как «непрерывное регулирование уплотнения» и широко используется совместно с системой записи и документирования, которая позволяет регистрировать полученные данные.

Система *Geodynamik* также выводит данные о частоте вибрации вальца и контролирует состояние «двойного скачка», которое возникает, когда валец приобретает такую высокую энергию, что начинает перемещаться вверх в цикле вибрации до тех пор, пока не ударит по грунту, пропуская таким образом каждый следующий удар. Машина, работающая в таком режиме, может повредить и себя, и материал, который уплотняет.

Система *Geodynamik* и аналогичные системы непрерывного регулирования уплотнения, такие как *Compaction Analyzer* компании *Dynapac*, прошли долгий путь к обеспечению оператора катка информацией о ходе процесса уплотнения. А в некоторых случаях такие компьютеризированные системы поставляются в комплекте с глобальной системой позиционирования GPS и могут устанавливаться на существующие машины.



Рис. 1. Каток BW213-4 BVC фирмы Bomag, на котором установлена фирменная система автоматизированного управления вибрационным усилием VarioControl (система IC) для грунтовых машин: в центре — основной пульт управления машиной; внизу справа — панель управления системой IC;верху справа — система документирования Bomag

Среди «интеллектуальных» нововведений можно также назвать, например, *колебательно-вибрационную систему*, которая позволяет вальцу раскачиваться (в отличие от обычной вибрации по вертикали). Компания *Geodynamik* начала развивать эту идею в 80-х годах прошлого века. Позднее компания *Hamm* разработала собственную колебательно-вибрационную систему уплотнения, которая предотвращает свёрхуплотнение путём изменения усилия цилиндра, когда материал начинает твердеть. По словам специалистов компании, это достигается путём физического расчёта системы дебалансов, обеспечиваю-

Хотя понятие «интеллектуального уплотнения» в применении к асфальтовым каткам имеет своих критиков, немало катков BW190AD-4 HF компании Bomag работают в Северной Америке в составе системы Asphalt Manager – части системы IC, разработанной специально для асфальтобетонных покрытий. По словам представителей фирмы, система IC работает в этом варианте надёжно.

шей вибрацию вальца. Ещё один пример проявления «интеллекта» в этой области — большой асфальтовый каток **DD-158HFA** компании **Ingersoll Rand**, который позволяет оператору выбирать одну из восьми установок амплитуды. Затем машина автоматически корректирует частоту колебаний для получения оптимального рабочего режима. Как бы ни «поумнели» машины благодаря использованию этих и многочисленных других новаций, процесс ИС выходит далеко за пределы предыдущих разработок. Далее приведено определение этой технологии, полученное на основании анализа нескольких источников.

Дорожный каток с системой ИС — это вибрационная машина, которая непрерывно измеряет и регистрирует жёсткость материала, одновременно и автоматически корректируя усилие уплотнения на основе этих измерений, расходуя больше энергии на мягких участках и меньше (или не расходуя вообще)

в твёрдых зонах (рис. 2). Каток снабжен системой документирования, которая позволяет корректировать процесс уплотнения в режиме реального времени и постоянно регистрировать результаты уплотнения, включая значения жёсткости в каждой точке каждого уложенного слоя.

Рис. 2. Система CompactoBag компании Geodynamik фиксирует значения жёсткости материала. Принцип работы этого устройства лежит в основе современных систем ИС. В начале 90-х годов компания Geodynamik разработала систему ИС, в которой регулируются не только амплитуда, частота, но и скорость машины



Потенциальные преимущества системы ИС

Среди потенциальных *преимуществ катков с системой ИС*, говорится в отчёте Федерального управления шоссейных дорог США, следует назвать *«рост производительности*, поскольку энергия уплотнения корректируется в зависимости от конкретных условий по результатам измерений жёсткости. В результате уплотнение увеличивается быстрее при первоначальных проходах, что может означать снижение числа проходов для достижения необходимых значений». Каток с системой ИС способен уплотнять слой большей толщины, «поскольку величина максимальной амплитуды, которая используется при первоначальных проходах катка, значительно увеличивается по сравнению с обычными катками».

Результатом возможности уменьшения числа проходов может стать экономия времени, топлива, а также затрат на техобслуживание машины. Некоторые специалисты указывают на то, что поскольку усилия уплотнения катка с системой ИС уменьшаются, то по мере приближения плотности материала к необходимому значению меньшая энергия (и меньше соответствующих напряжений) отражённо воздействует на конструкцию машины и трансмиссию, что явно снижает износ.

Наряду с ростом производительности, как указано в отчёте, появляется возможность повышения качества уплотнения в двух направлениях. **Во-первых**, поскольку наличие системы ИС на катке позволяет избежать переуплотнения и недоуплотнения, прилагая дополнительное усилие только там, где это необходимо, фактически мы имеем своего рода форму управления технологическим процессом. Такой контроль повышает однородность уплотнения при условии, что влажность грунта находится в пределах значений, достаточных для достижения необходимой степени уплотнения. **Во-вторых**, опытные работы на ряде участков показали, что катки, оборудованные системой ИС, как и обычные машины, не могут уплотнять любые грунты при любых условиях. Грунт влажностью, далекой от оптимальной, со слабым или сильно увлажнённым подстилающим слоем и другими проблемами, не может быть уплотнён до запланированного уровня. Однако благодаря документации, которую система ИС создаёт путём непрерывной регистрации показателей по всей зоне производства работ, такие проблемные участки можно выявить и скорректировать до того, как их покроет новый слой земляного полотна.

Меньше проверок, ценный отчётный материал

Документирование, которое обеспечивает система автоматизированного управления процессом уплотнения, также позволяет упростить контроль качества. Поскольку каток с системой ИС автоматически проверяет результаты уплотнения практически в каждой точке строительной площадки, для выборочной проверки вручную может потребоваться несколько участков. В противном случае приходится проводить более широкую проверку качества работ вручную (в относительно небольшом числе точек по сравнению с полным охватом зоны работ системой ИС). Проведение проверок вручную (испытания по методу замещения песком, высверливание образцов асфальта или применение приборов неразрушающего контроля) требует много времени,

затрат и может быть опасным на стройплощадках с большими потоками машин. Полное документирование результатов уплотнения может служить подтверждением показателей работы строительных подрядчиков в случае возникновения споров по гарантийным обязательствам, а также стать основанием для премирования (штрафования) работников за высокое (низкое) качество работы.

Интеллектуальное уплотнение позволяет получить всестороннюю информацию о механических свойствах уплотнённых материалов, чтобы связать проект, строительство и качество работ (рис. 3). Полученные данные имеют важное значение для определения режима эксплуатации построенной дороги. Многолетние показатели можно коррелировать с характеристиками, полученными при строительстве.

Конечный выигрыш от применения технологии ИС — это прежде всего возможность создания структур с более высокой долговечностью. Европейский опыт показывает, что повышение однородности уплотнения увеличивает долговечность систем дорожных покрытий, аналогичные выгоды можно получить при уплотнении откосов и обратной засыпке подземных сооружений.

Общие характеристики конструкции

В отношении систем ИС в целом можно сказать, что на большинстве катков для измерения движения валцов относительно рамы используются акселерометры (датчики усилий/движения). На основе полученных данных с помощью компьютерной программы рассчитывается жёсткость, за исключением системы ИС для асфальта, которую собираются выпускать фирма Sakai, — на двухвалцовых катках система ИС будет регулировать усилие только на одном валце.

Необходимо учитывать специфические особенности систем разных изготовителей. Большинство изготовителей считают, что измеряемые их системами значения жёсткости хорошо коррелируются с результатами метода Проктора при условии, что грунты относительно однородны, сыпучи по характеру и их влажность находится в допустимых пределах. Некоторые утверждают, что полученные ими значения жёсткости хорошо коррелируются с результатами метода Маршалла. Другие проводят исследования в целях уточнения корреляции значений жёсткости асфальта, зарегистрированных датчиками, со значениями, полученными обычными методами.

В программном обеспечении системы ИС в качестве основы регулирования энергии валь-

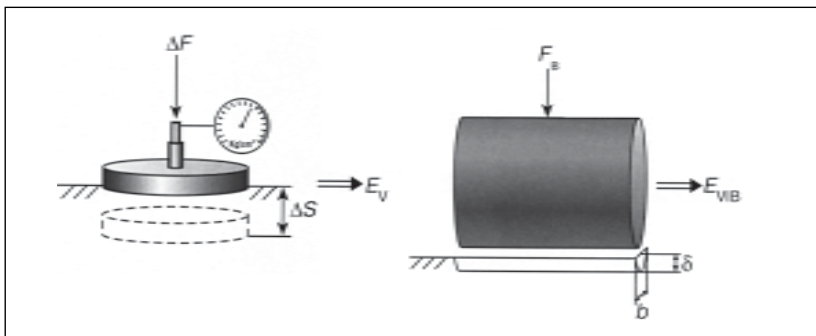


Рис. 3. Аналог модуля вибрации (E_{vib}) модулю деформации (E_v) в системе фирмы Bomag: ΔF — изменение усилия; ΔS — изменение просадки; F_v — усилие вальца; b — ширина отпечатка вальца; δ — просадка

В ходе исследования предложено графическое изображение того, как компания Bomag объясняет значения жёсткости, которые регистрирует её система СИ. Измерение этого показателя основано на методике испытаний грунта (пробным нагружением плиты), которая позволяет коррелировать усилие и деформацию или просадку. Благодаря этой методике можно учитывать не только глубину просадки, но и площадь воздействия.

ца, передающейся материалу, используются данные измерения жёсткости по реакции виброрывальца на материал под ним. Однако некоторые изготовители экспериментируют с системой ИС, функционирование которой не будет базироваться на вибрации вальца, а вместо этого жёсткость материала будет коррелироваться с сопротивлением вращению вальца. Если будет доказана целесообразность применения такой системы, то концепцию ИС можно распространять на невибрационные машины и использовать в качестве альтернативного метода в трамбовочных машинах для определения значений жёсткости при работе на связных грунтах.

В большинстве случаев системы регистрации и документирования, которые составляют неотъемлемую часть комплекса ИС, могут быть обычного типа (вручную запускать и останавливать процесс регистрации данных на определённом отрезке рабочей зоны) или базироваться на глобальных системах GPS, Glonass или на полностью роботизированной станции, которые автоматически обеспечивают позиционирование с точностью до нескольких сантиметров. По мере расширения применения технологии ИС скорее всего будут преобладать спутниковые системы, а обычные системы (или возможность переключаться на них) будут использоваться в местах, где не обеспечен качественный приём сигналов системы GPS.

Исследования продолжаются

Интеллектуальное уплотнение имеет своих критиков, которые выражают сомнение в эффективности систем ИС, установленных на

машинах по уплотнению асфальтобетонных покрытий. Некоторые утверждают, что при уплотнении горячей асфальтобетонной смеси технология ИС недостаточно отработана, чтобы замечать разницу между жёсткостью, созданной ростом уплотнения материала, и жёсткостью, появившейся в результате охлаждения смеси и последующей потери текучести асфальта и цемента. Другие подвергают сомнению способность системы ИС при укладке тонких слоёв различать поверхностную жёсткость и жёсткость подстилающих слоёв. Наконец, есть такие, кто утверждает, что акселерометры – основные датчики в системах ИС – малопригодны для измерения жёсткости асфальта. Представляет интерес *система ACD* (система документирования уплотнения асфальта) *фирмы Geodynamik*, в которой для оценки степени уплотнения асфальта вместо акселерометров используются *фирменные алгоритмы*. В системе ИС *компании Duparac*, предназначенной для асфальтобетонных покрытий, которая в настоящее время разрабатывается, также нет акселерометров.

Критикуют катки с системой ИС и за то, что они не могут обеспечить надёжное измерение жёсткости, когда валец находится в процессе корректировки усилия. Однако сторонники ИС возражают, говоря, что эти системы (в которых для изменения усилий меняется амплитуда) построены таким образом, чтобы выбирать «фиксированную» амплитуду в процессе настройки, поэтому им можно доверять.

Существуют и другие мнения: если достигнут предел, то продвижение вперёд сомнительно.

Очевидно, что преодолеть присущие классической укатке недостатки в рамках этого метода принципиально невозможно, так как распределение и укладка дорожно-строительного материала проводятся одними машинами, а уплотнение уложенного слоя – другими. Только *объединив эти операции в единый процесс*, можно кардинально избавиться от

выявленных недостатков. Такой способ укатки был предложен и запатентован авторами статьи [2].

Совмещение технологических процессов укладки, разравнивания и уплотнения дорожных материалов в один непрерывный процесс (рис. 4), а также уменьшение количества технологического оборудования, возможность использования одной и той же машины для сооружения жёстких дорожных покрытий из бетонных смесей и дорожных покрытий нежёсткого типа из асфальтобетона, чёрных щебёночных, гравийных и грунтоцементных смесей позволяет значительно сократить производственные затраты дорожно-строительных организаций. Существенно улучшаются условия труда дорожных строителей за счёт ликвидации вибрации и сильных шумов.

В развитии техники прослеживаются два пути: совершенствование машин и механизмов для использования известных приёмов труда (технологий) и создание машин, отличных от традиционных, для применения принципиально новых технологий (технологий, основанных на принципах, ранее не известных или не востребованных).

Оставив критику, можно сказать, что анализ результатов научных исследований и экспериментов, практический опыт подрядчиков, использующих машины с системами ИС как на грунте, так и на асфальте, помогут установить реальные возможности технологии ИС.

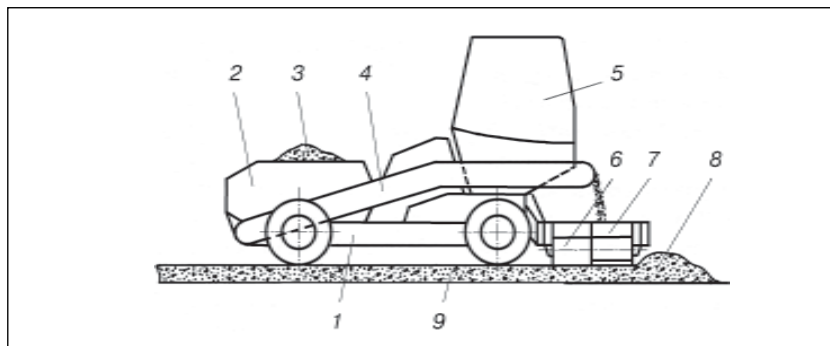
Измерение уплотнения: фундаментальные изменения

В дополнение к оценке процесса ИС на строительных площадках возникла родственная проблема, решением которой занимаются всё больше инженеров и учёных, а именно: как лучше измерять степень уплотнения материала? Для грунта общепринятый метод Проктора, позволяющий измерять «плотность в сухом состоянии» в качестве показателя уплотнения, кажется, уступает методам, в которых измеряется жёсткость материала, определяемая как показатель способности материала сопротивляться деформации под нагрузкой.

Жёсткость, по-видимому, лежит в основе расчётов более фундаментальной характеристики материала – модуля, который, по мнению учёных, является наиболее точным и независимым средством определения деформации, а значит и степени уплотнения материала. Вопрос о модуле сложен и усложняется ещё больше, если учитывать различия связных и несвязных грунтов.

Рис. 4. Схема неклассического катка:

1 – самоходное колёсное шасси;
2 – приёмный бункер; 3 – дорожно-строительный материал;
4 – ленточный транспортёр-питатель;
5 – кабина;
6 – валец; 7 – бункер-течка; 8 – волна выжимаемого дорожно-строительного материала;
9 – укладываемая дорожная полоса



Один из наиболее авторитетных исследователей в этой области Жан-Луи Брио — доктор философии, преподаватель гражданского строительства в Техасском университете А&М — много писал о модуле грунта и разработал *измеритель уплотнения Брио (BCD)* для быстрого определения этого модуля.

Термины, связанные с уплотнением

Механизм вибровозбудителя — система вращающихся дебалансов в вальце катка, который заставляет валец совершать эксцентриковое движение.

Частота — частота вращения механизма вибровозбудителя, обычно выраженная в колебаниях в минуту (кол/мин).

Амплитуда — показатель движения вальца от центра, выраженный в тысячных долях дюйма. Валец, который перемещается (или вибрирует) по вертикали, поднимается над поверхностью настолько, насколько он опускается ниже поверхности. В этом случае амплитуда обычно определяется как половина полного хода вальца.

Ротационный вибровозбудитель — механизм вибровозбудителя, который заставляет валец перемещаться вне центра круговым или эллиптическим движением.

Колебательный вибровозбудитель — механизм вибровозбудителя, который заставляет валец колебаться на поверхности вперед и назад.

Направленный вибровозбудитель — механизм вибровозбудителя, который заставляет валец двигаться в вертикальном направлении (в некоторых случаях направление движения может изменяться на 90° с вертикального на горизонтальное).

Двойной скачок — состояние, в котором валец пропускает каждый следующий удар из-за того, что он приобрел так много энергии, что начинает перемещаться вверх в цикле вибрации до того, как ударит по грунту.

Список литературы

1. «Construction Equipment». 2006. № 4 (США).
2. «Строительные и дорожные машины». 2001. № 3.

СДМ