

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ДОРОЖНЫМ КАТКОМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ

Кочеткова М.Е., Чечура И.А.

**научный руководитель канд. техн. наук Прокопьев А. П.
Сибирский федеральный университет**

Интеллектуальное уплотнение (Intelligent Compaction) представляет собой конструктивный метод использования современных вибрационных катков, оборудованных интеллектуальными компонентами и технологиями.

Технология IC и ее технические условия существуют в Европе уже более 20 лет. В соответствии с документацией Федерального управления шоссейных, различные катки IC от производителей по всему миру стабилизировали базы интеллектуальных исследований. Вплоть до введения в структуру передачи информации катка инфракрасных датчиков температуры, и интегрированных систем отчетности.

Результатом возможности уменьшения числа проходов может стать экономия времени, топлива, а также затрат на техобслуживание машины. Поскольку усилия уплотнения катка с системой IC 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, появляется возможность повышения качества уплотнения в двух направлениях. Во-первых, поскольку наличие системы интеллектуального уплотнения 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 IC, 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 IC создает 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.

Таким образом, каток, оснащенный технологией интеллектуального уплотнения способен адаптировать свое поведение в ответ на различные изменения в структуре грунта и асфальтобетонного покрытия.

Среди основных производителей IC-катков – компании Ammann/Case, Bomag, Caterpillar, Dynapac, Volvo (прежде Ingersoll Rand), Sakai America и Hamm.

В своей работе мы подробно рассмотрим технологию, использующуюся на катках Ammann - контрольно-измерительная система ACE (Ammann Compaction Expert) и на катках Caterpillar.

1. Система Ammann ACE Plus вычисляет жесткость грунта k_s (k_b) один раз за цикл вибрации. k_b определяется из одномерной нелинейной механической модели, основанной на теории хаотических колебаний. Интеллектуальное уплотнение включает в себя вибрационный каток с измерением и контролем технологии, которая выбирает

оптимальные параметры для уплотнения. В операции, которая интегрируется в рабочий процесс, уплотнение измеряется в виде текущей жесткости и несущей способности грунта.

В сочетании с данными из GPS (Global Positioning System), визуализируется обзор выполняемой работы, выводимый на дисплей и датчики. Уравнения сил были составлены от взаимодействия вальца и дорожного покрытия. Значения сил взаимодействия могут быть получены из таких данных, как частота колебаний и амплитуда смещения вальца, а затем рассчитана жесткость грунта k_b . Смещение вальца выражается как функция косинуса. Частота колебаний зависит от режима вибрации вальца на различных этапах:

- постоянный контакт с вальцом (линейная функция): $i = 1$;
- периодические потери контакта (нелинейная функция): $i = 1, 2, 3$;
- подпрыгивания (субгармоническая функция): $i = \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, 3$

$$k_b = 4\pi^2 f^2 \left[m_d + \frac{m_e r_e \cos \varphi}{a} \right], \quad (1)$$

где f – частота возбуждения; $m_e r_e$ – эксцентриковый массовый момент; φ – задержка фазы между эксцентриковой силой и смещением вальца; a – амплитуда колебаний вальца.

Система измерений k_b может выполняться вручную, либо в автоматическом режиме с обратной связью AFC (Adaptive Feedback Control). Есть три варианта настройки ACE Plus системы:

- 1) низкий уровень производительности (мах сила воздействия $F_s=14$ кН. С a (амплитудой) от 0,4 до 1,5 мм);
- 2) средний уровень производительности (мах $F_s=20$ кН, с a от 1,0 до 2,0 мм);
- 3) высокий уровень производительности (мах $F_s>25$ кН, с a от 2,0 до 3,0 мм)

По выбранному уровню силы каток корректирует эксцентриковый массовый момент, чтобы поддерживать силу воздействия $F_{s(max)}$. Частота воздействия корректируется так, чтобы поддерживать φ задержки фазы между 140° и 160° . Для уровня высокой силы частота, требуемая для поддержки соответствующего φ , составляет 23-25 Гц. Поскольку амплитуда уменьшается, частота, требуемая для поддержки соответствующего φ , имеет максимальное значение до 35 Гц.

Система ACE Plus может также использовать указанное пользователем значение k_b в качестве параметра контроля. В названном способе измерения модуля пластины выбрано предельное значение для k_b . Когда предопределенное значение k_b достигнуто, система ACE Plus автоматически уменьшает эксцентриковый массовый момент до $0,5 \cdot F_{s(max)}$ для выбранного диапазона. Кроме того, система ACE Plus вычисляет оптимальную скорость, основанную на желаемом интервале воздействия 20-40 мм. Оператор может использовать измеритель в кабине катка, чтобы контролировать разомкнутый контур скорости. Наконец, система ACE Plus следит за непостоянными покачиваниями или скачками (прежде всего посредством анализа подгармоники) и автоматически уменьшает эксцентриковый массовый момент, пока не восстановится устойчивая работа.

При работе в режиме AFC перенастраивается автоматически, как начинают происходить колебания, проводится корректировка для регулировки амплитуды колебаний и частоты возбуждения.

$$F_s = (m_f + m_d)g + m_e r_e \Omega^2 \cos(\Omega t) - m_d \ddot{x}_d = x, \quad (2)$$

где F_s – сила воздействия (кН); $g = 9,8$ (м/с²); m_d – масса вальца (кг); m_f – масса катка (кг); x_d – вертикальное перемещение барабана (м); $m_e r_e$ – эксцентриковый массовый момент (кг·м); Ω – круговая частота возбуждения (Гц).

Точечная нотация означает дифференцирование по времени, альтернативно:

$$F_s = k_s x_d + c_s \dot{x}_d, \text{ если } F_s \geq 0, F_s \equiv 0; \quad (3)$$

где k_s – коэффициент упругости грунта, Н/с; c_s – коэффициент вязкости грунта, Н с/м.

$$x_d = \sum_i A_i \cos(i \Omega \cdot t - \varphi_i) \dot{x}_d = x \quad (4)$$

Таким образом, идет постоянный автоматический контроль процесса уплотнения путем изменения амплитуды и частоты, в дополнение к этому отображение оператору на датчиках оптимальной скорости, измерение жесткости почвы, кроме того, для асфальтобетонных дорожных покрытий измерение температуры поверхности покрытия.

Амплитуда смещения вальца и частота возбуждения рассчитываются каждые 360 градусов (25-50 раз в секунду), в зависимости от типа катка. Также, для достижения оптимального результата уплотнения, важны следующие задачи:

- 1) информация о достигнутых значениях уплотнения, в том числе расположение координат (GPS);
- 2) информация о количестве проходов и однородность k_s (k_b);
- 3) данные уплотнения асфальта: температура, скорость охлаждения асфальта и другие.

Технология метода MDP (Machine Drive Power) – метод компании Caterpillar, в настоящее время находящийся в процессе своего развития. Суть метода заключается в измерении энергии, необходимой для того, чтобы преодолеть сопротивление движению (см. рисунок).

Использование показателя MDP идеально подходит для связных грунтов, а также подходит для статических режимов катков.

MDP использует идею сопротивления качению и углубления, чтобы определить усилия, действующие на валец. MDP вычисляется по формуле:

$$MDP = P_g - WV(\sin\theta + \frac{a}{g}) - (mV + b), \quad (5)$$

где P_g – валовая сила, необходимая для того, чтобы переместить машину (кН); W – вес катка (т); a – ускорение машины (м/с²); g – ускорение силы тяжести (м/с²); θ – угол наклона (подачи катка) (град.); V – скорость катка (м/с); m и b – коэффициенты внутренних потерь машины, определенные для каждой машины.

Второй и третий элементы уравнения 5 учитывают тяговую силу, связанную с углом наклона и внутренними потерями машины, соответственно. Поэтому, MDP получает только тяговую силу, связанную со свойствами материала.

До использования MDP калибруют для θ , m и b (см. уравнение 5).

Во-первых, ориентация датчика подачи катка находится по значениям подачи, когда каток припаркован на той же самой наклонной поверхности, стоящий в гору и под гору. Среднее значение этих двух величин есть отклонение подачи, применяемое ко всем более поздним значениям датчика.

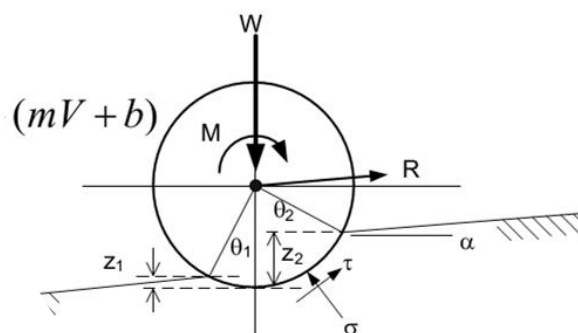


Рисунок – Двумерная диаграмма истинных усилий, действующих на валец при уплотнении (MDP увеличивается с увеличением z_2)

Коэффициенты внутренних потерь m и b определяются при движении катка по относительно однородной, неизменной поверхности калибровки. P_g и компенсация наклона (т.е. второй элемент уравнения 5) контролируются при движении катка в двух направлениях, вперед и назад, в диапазоне скоростей катка, ожидаемых во время дорожно-строительных операций, в основном 3 – 8 км/ч. На каждой скорости катка различие между P_g и компенсацией наклона взято в качестве внутренней потери энергии машины.

Диаграммы компенсированной на наклон тяговой силы и скорости катка обеспечивают линейные соотношения, из которых вычисляются коэффициенты внутренних потерь m и b . Соединив компенсацию наклона и внутренние потери машины в уравнение 5 MDP для работы катка на поверхности при калибровке получаем приблизительно равным 0 кДж/с.

MDP является относительным значением, ссылающимся на свойства материала поверхности калибровке, которая в основном является жестким, полностью уплотненным грунтом. Положительные значения MDP указывают на материал, который менее уплотнен, чем поверхность калибровки, в то время как отрицательные значения MDP указывают на материал, который более уплотнен (меньшее утопление вальца катка).

Эти и подобные им системы позволяют вести непрерывный контроль над степенью уплотнения и настраивать амплитуду и частоту колебаний вибратора в зависимости от рабочей скорости катка и температуры поверхности асфальтобетона.

Также обе из представленных выше систем используют GPS технологию.

GPS на основе уплотнения на виброкатках находит свой путь на строительных площадках по всему миру. GPS на основе информации о уплотнении связывает кинематику машины с работой интегрированного процесса измерения и контроля технологии в вибрационном катке, создавая, таким образом, общий процесс управления и мониторинга.

Выводы. В технологическом комплексе дорожно-строительных работ для обеспечения высокого качества готового покрытия необходимо внедрение автоматического управления процессами на этапе укладки и уплотнения смеси.

Учитывая отсутствие единого подхода к оценке требуемых и достигнутых результатов уплотнения материалов, существует необходимость подробного рассмотрения технологий уплотнения как асфальтобетонной смеси, так и грунта.

В работе обоснованы предпосылки для применения критериев и разработки алгоритмов программного обеспечения методов интеллектуального уплотнения.