

Носов С. В., канд. техн. наук, доц.
Липецкий государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЖЕСТКИМ ВАЛЬЦОМ ДОРОЖНОГО КАТКА

nosovsergej@mail.ru

Разработаны математическая модель процесса уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей жестким вальцом дорожного катка статического и вибрационного типа и алгоритм расчета деформаций уплотняемых слоев, основных параметров применяемых катков и их технологических режимов работы на основе нового реологического подхода к оценке деформационных характеристик уплотняемых материалов. Раскрыта физическая сущность развития деформаций уплотняемого слоя и модулей деформаций материалов во времени под действием вибрационной и статической уплотняющих нагрузок.

Ключевые слова: деформация уплотняемого слоя, коэффициент эффективности виброкатка, параметры катка, модуль деформации уплотняемого материала.

Для уплотняющих машин основным критерием эффективности является уплотняющая способность, которая выражается через необратимую часть деформации уплотняемого слоя в единицу времени или за один цикл нагружения. При этом эффективность уплотнения дорожными катками в первую очередь зависит от вертикального давления вальцов. В направлении движения катка действуют лишь незначительные горизонтальные усилия уплотнения.

Учитывая также, что валец дорожного катка имеет значительную ширину, вполне уместно предположить, что формоизменение уплотняемого материала в поперечном направлении относительно направления движения катка будет отсутствовать (в большей степени это относится к уплотнению слоев асфальтобетонных смесей) и, таким образом, можно перейти от четырехмерного моделирования к двумерному, включающему вертикальную координату и временной фактор.

На рис. 1 представлены типовые диаграммы изменения вертикальных контактных напряжений и деформации уплотняемого слоя за один цикл нагружения или за один проход вальца. Как видно, закон развития контактных напряжений в точке под катящимся вальцом представляет собой сложную функцию, которая с определенной степенью точности может быть заменена треугольным законом нагружения, из условия равенства выполнения работ или, что тоже самое, равенства площадей фигур «напряжение – время».

В этом случае развитие деформации ε , включающей в себя как обратимую ($\varepsilon_{об} + \varepsilon_{об}^{-1}$), так и необратимую ($\varepsilon_n + \varepsilon_n^{-1}$) части, будет протекать по определенному закону. Зная закон раз-

вития полной деформации, описываемой теорией наследственной вязкоупругости при ступенчатом законе нагружения [1], определим закономерность развития полной деформации при треугольном законе нагружения.

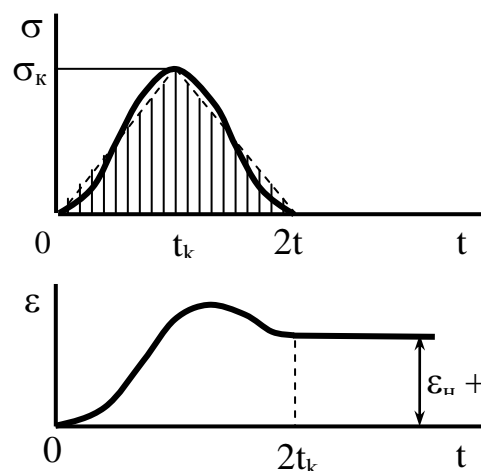


Рис. 1. Диаграммы изменений напряжения и деформации за один проход вальца катка

При возрастающей нагрузке от 0 до σ_k на отрезке времени $0 \leq t \leq t_k$ развитие деформации будет протекать по закону [1]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_k \cdot t}{t_k \cdot E} + \frac{\sigma_k}{t_k \cdot E} \cdot \int_0^t K(t-\tau) \tau d\tau, \quad (1)$$

где σ_k – максимальные контактные давления, развивающиеся под катящимся вальцом, МПа; E – мгновенный модуль деформации уплотняемого материала, МПа; $K(t-\tau)$ – функция скорости ползучести.

При убывающей нагрузке от σ_k до 0 на отрезке времени $t_k \leq t \leq 2t_k$ развитие деформации будет протекать по следующему закону:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_k}{t_k \cdot E} \left[2t_k - t + \int_0^{t_k} K(t-\tau) \tau d\tau + 2t_k \int_{t_k}^t K(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{2t_k}\right) d\tau \right]. \quad (2)$$

В конце цикла процесса нагружения, при $t = 2t_k$, полная деформация

$$\varepsilon(2t_k) = \frac{\sigma_k}{t_k \cdot E} \left[\int_0^{t_k} K(t-\tau)\tau d\tau + 2t_k \int_{t_k}^{2t_k} K(t-\tau)\left(1 - \frac{\tau}{2t_k}\right) d\tau \right]. \quad (3)$$

Зная закон развития обратимой части деформации, определяемой по выражению

$$\varepsilon_{об} + \varepsilon_{обt} = \frac{\sigma_k}{U} \left[1 + \int_{2t_k}^{2t_k+t_p} T(t-\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

где U - модуль обратимой деформации материала, МПа; $T(t-\tau)$ - ядро интегрального уравнения второго рода, описывающее обратимую часть деформации ползучести; t_p - время разгрузки, с, необратимая деформация слоя материала после прохода вальца катка составит:

$$\varepsilon_{и} + \varepsilon_{ит} = \varepsilon(2t_k) - (\varepsilon_{об} + \varepsilon_{обt}). \quad (5)$$

Следует отметить, что такой математический подход к вычислению полной и необратимой деформаций материала позволяет использовать значение модуля деформации материала, определенного при режиме нагружения, подчиняющегося закону Хевисайда [1]:

$$E = \frac{1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau}{\chi_k[x_i] \cdot \varepsilon(t) / \sigma}, \quad (6)$$

где $\varepsilon(t) / \sigma = \bar{\varepsilon}_y(t)$ - величина экспериментальной кривой податливости в момент времени t ; применяется при наложении экспериментальных кривых податливости на семейство теоретических кривых по методике [1]; $\chi_k[x_i]$ - функция подобия между базовой и любой другой кривыми ползучести.

Выбор и применение гладковальцового катка необходимо производить с учетом прочностных характеристик уплотняемого слоя. Контактные давления, развивающиеся под рабочими органами уплотняющих машин, не должны превосходить предела прочности уплотняемого материала [2, 3]:

$$\sigma_k = K \cdot \sigma_p, \quad (7)$$

где $K < 1$ - коэффициент, определяющий рациональное значение максимальных контактных давлений под вальцом катка, значение которого меняется в зависимости от начальной плотности уплотняемого материала [3].

Экспериментальные исследования показали, что уплотнение материала зависит не только от линейного давления катка, но и от диаметра вальца [4]. Установлена взаимосвязь между линейным давлением, радиусом вальца и модулем деформации материала (на примере асфальтобетонной смеси), которая выражается через шири-

ну пятна контакта вальца катка со слоем уплотняемого материала. Зная скорость движения катка, определяется время воздействия нагрузки со стороны вальца на уплотняемый слой в каждой его точке по выражению

$$2t_k = \frac{2e}{V_k} = \frac{f(R; E; q)}{1000V_k}, \quad (8)$$

где $2e = f(R; E; q)$ - ширина пятна контакта вальца катка со слоем асфальтобетонной смеси, мм; R - радиус вальца, м; E - модуль деформации уплотняемого материала, МПа; q - линейное давление катка, кН·м⁻¹; V_k - скорость движения катка, м·с⁻¹.

Эффективность уплотнения оценивается по необратимой части деформации слоя, которая образуется в результате воздействия на материал циклической нагрузкой. Деформация зависит не только от напряжения, но и от времени его действия, а также от скорости изменения напряженного состояния [1, 3].

В то время, как величина и скорость изменения напряженного состояния под вальцом статического катка могут быть определены расчетным путем довольно легко, то для вибрационного вальца, и вообще всех вибрационных уплотняющих рабочих органов, это сделать практически невозможно из-за довольно сложных явлений и процессов, протекающих в уплотняемом материале под действием нагрузки со стороны рабочего органа.

Одним из наиболее удачных приемов, позволяющих оценить эффективность виброкатка, а также выбрать его основные режимы работы и параметры, является прием, используемый Зубановым М.П. [5] и Хархутой Н.Я. [6]. Здесь подбирают такие параметры вибрации, при которых деформация под вибрационным рабочим органом развивается одинаково с деформацией под статическим рабочим органом с аналогичными геометрическими размерами, масса которого в несколько раз больше массы вибрационного рабочего органа. В этом случае вводится понятие эквивалентных контактных давлений, развивающихся под вибрационным рабочим органом, численно равных давлениям под статическим рабочим органом:

$$\sigma_{эkv} = \sigma_k, \quad (9)$$

причем

$$\sigma_{эkv} = \sigma_{ст.в.} + \sigma_{дин.в.} = \sigma_{ст.в.} \left(1 + \frac{\sigma_{дин.в.}}{\sigma_{ст.в.}} \right), \quad (10)$$

где $\sigma_{ст.в.}$ - давления, вызванные силой тяжести вибровальца; $\sigma_{дин.в.}$ - давления, вызванные действием вибрации.

Удобной величиной для оценки вибрационного воздействия является выражение, полученное из (10):

$$1 + \frac{\sigma_{дин.в.}}{\sigma_{ст.в.}} = \frac{\sigma_{экв.}}{\sigma_{ст.в.}} = K_{\mathcal{E}}, \quad (11)$$

где $K_{\mathcal{E}}$ - коэффициент эффективности вибрационного воздействия, который показывает, во сколько раз давление от силы тяжести вибровальца может быть меньше давления вальца статического действия при условии одинакового эффекта уплотнения.

Вытекающее из формулы Хархуты Н.Я. [3, б] выражение для эквивалентных контактных давлений, с учетом подрессоренной части катка, имеет вид

$$\sigma_{экв.} = \sqrt{\frac{(q_{под} + K_{\mathcal{E}}^2 q_{ст.в.}) \cdot E}{R}}, \quad (12)$$

где $q_{под}$ - линейная нагрузка на контакте вальца со слоем от массы рамы, приходящейся на валец; $q_{ст.в.}$ - линейная нагрузка на контакте вальца со слоем от самого вальца в статическом состоянии; E - модуль деформации уплотняемого материала; R - радиус вальца.

Зная $K_{\mathcal{E}}$, E и $\sigma_{экв.} = \sigma_{к.}$, можно определить линейную нагрузку от вибровальца:

$$q_{ст.в.} = \frac{q_{ст.}}{(\beta + K_{\mathcal{E}}^2)} \quad (13)$$

и массу применяемого для уплотнения виброкатка

$$M_{вибр.} = \frac{2M_{ст.}}{(\beta + K_{\mathcal{E}}^2)}, \quad (14)$$

где $\beta = q_{под} / q_{ст.в.}$; $M_{ст.}$ - масса статического катка.

Развитие деформаций уплотняемого слоя от вибрационной и статической нагрузок протекает по-разному и с различной интенсивностью, что физически объясняется различием структурных изменений в материале при его уплотнении. Так, при уплотнении статической нагрузкой постепенное сближение минеральных частиц уплотняемого материала приводит к их быстрому заклиниванию между собой. Их относительное перемещение достаточно затруднительно за счет образовавшихся связей в точках контактов. Поэтому первая половина цикла нагружения такой нагрузкой характеризуется довольно быстрым ростом деформации, пока количество связей, сдерживающих развитие деформации, не столь велико, а вторая - резким снижением скорости деформации за счет новообразованных на этом этапе удерживающих связей, препятствующих

относительному перемещению частиц и, следовательно, развитию деформации. Вследствие такого напряженного состояния обратимая часть деформации в момент разгрузки довольно велика, что выражается в проявлении упругих сил между частицами каменного материала.

При вибрационном способе уплотнения дорожно-строительных материалов импульсы, сообщаемые частицам каменного материала, не только обеспечивают нарушение связей между частицами, но и способствуют изменению вязкости объемного и пленочного битума в асфальтобетонных смесях или общей вязкости грунта. Именно поэтому эффективность вибрационной нагрузки по отношению к статической должна сильнее проявляться на завершающей стадии уплотнения, когда количество связей велико и их преодоление намного легче обеспечивается вибрационной нагрузкой. Последнее выражается в не столь быстром снижении скорости деформации уплотняемого слоя, чем при уплотнении его статической нагрузкой.

На рис. 2,б представлены диаграммы развития деформаций при статическом (кривая 1) и вибрационном (кривые 2 и 3) нагружении слоя уплотняемого дорожно-строительного материала по закону Хевисайда. Равенство в необратимых частях деформаций кривых 1 и 2 указывает на одинаковую эффективность уплотнения статической и вибрационной нагрузками. При этом режим статического нагружения обусловлен повышенной массой рабочего органа по отношению к вибрационному.

На первом этапе цикла нагружения, при условии одинаковых начальных технологических параметров состояния уплотняемого слоя, скорость деформации при статической нагрузке выше, чем у вибрационной, что объясняется превосходящим влиянием увеличенной массы статического рабочего органа по отношению к вибрационному рабочему органу меньшей массы. На последнем этапе цикла нагружения, когда проявляется превосходящий эффект со стороны вибрационного рабочего органа с меньшей массой по отношению к статическому уплотняющему рабочим органом повышенной массы, скорость развития деформации под последним будет меньше. Следует также отметить, что в силу меньшего сопротивления упругих сил, возникающих в уплотняемом материале со стороны минеральных частиц при виброуплотнении, обратимая часть деформации будет также меньше по сравнению с обратимой деформацией при статическом нагружении.

Следовательно, процесс развития деформации слоя уплотняемого материала при статическом и вибрационном режимах нагружения

будет протекать по разным законам. Данное обстоятельство подтверждается предшествующими исследованиями [7].

Таким образом, сравнивая эффективность процесса уплотнения при использовании вибрационного и статического катков по контактными

давлениям, развивающимся под их вальцами, следует в первую очередь иметь в виду равенство необратимых деформаций за один цикл нагружения при одинаковых начальных параметрах состояния уплотняемого слоя.

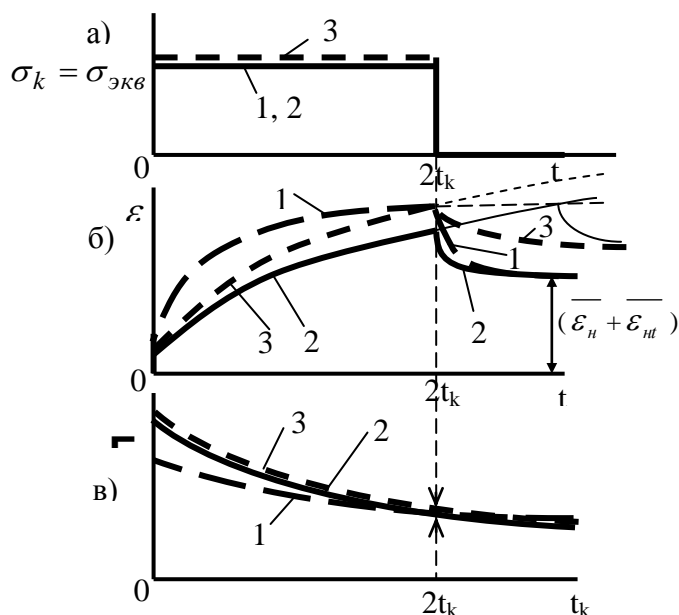


Рис. 2. Диаграммы развития контактных давлений (а), деформаций (б) и модулей деформации (в) во времени при нагружении слоя грунта или асфальтобетонной смеси:

1- статической нагрузкой; 2, 3 - вибрационной нагрузкой

Прием, связанный с определением параметров и технологических режимов работы виброкатков по эквивалентным контактным давлениям, очень удобен с точки зрения упрощения сложных расчетов, которые могут быть применимы в других подходах к поставленной задаче. Поскольку полная деформация при статическом и вибрационном режимах нагружения слоя развивается по разным законам, то изменение модуля деформации во времени будет протекать аналогично (рис. 2,в):

$$E = \frac{\sigma_K \cdot d_{um}}{\lambda(t)} = \frac{\sigma_K}{\varepsilon(t)}, \quad (15)$$

где d_{um} - диаметр штампа; $\lambda(t)$ - осадка штампа; $\varepsilon(t)$ - относительная деформация слоя.

Так, при $t = 0$, вследствие большего значения мгновенной деформации при статическом нагружении имеем $\varepsilon_1(0) > \varepsilon_2(0)$ и тогда

$$E_3 = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} > E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \quad \text{и} \quad E_3 = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} > E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}, \quad (17)$$

где первое неравенство в (17) составлено на основе нелинейности физико-механических свойств материала уплотняемого слоя.

Так как различия между напряжениями и деформациями кривых 1, 2 и 3 в момент времени $2t_k$ невелики, то с учетом (17) с определенной степенью точности можно принять условие

$$E_{01} < E_{02}. \quad (16)$$

Определение параметров виброкатка должно производиться с учетом физико-механических свойств уплотняемого слоя, которые, в свою очередь, зависят от режима его работы. В связи с этим модуль деформации необходимо определять в тот момент времени, когда заканчивается действие нагрузки, так как здесь завершается процесс формирования структуры материала за один цикл уплотнения и деформация максимальная. Определив по выражению (8) время $2t_k$, можно определить модуль деформации слоя при статическом нагружении в указанный момент времени по выражению (15).

Что касается модуля деформации слоя при уплотнении его вибрационной нагрузкой, то здесь следует отметить следующее. В момент времени $2t_k$ (рис. 2,б) при $\sigma_1 = \sigma_2 < \sigma_3$ можно записать $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 > \varepsilon_2$. Тогда

$$E_2 \approx E_1 = E. \quad (18)$$

Тогда на основе выражений (3), (4) и (5) можно записать:

- для статической нагрузки с учетом функций подобия (на примере асфальтобетонной смеси):

$$(\varepsilon_n + \varepsilon_{nt})_{cm} = \frac{\chi_{\kappa}^{cm} [\sigma_{\kappa}; T; K_y]}{t_{\kappa}} \left\{ \chi_o^{cm} \left[\int_0^{t_{\kappa}} K_{cm}(t-\tau) \tau d\tau + 2t_{\kappa} \int_{t_{\kappa}}^{2t_{\kappa}} K_{cm}(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{2t_{\kappa}}\right) d\tau \right] - \chi_{oOB}^{cm} \cdot t_{\kappa} \cdot \left[1 + \int_{2t_{\kappa}}^{2t_{\kappa}+t_p} T_{cm}(t-\tau) d\tau \right] \right\}; \quad (19)$$

- для вибрационной нагрузки с учетом функций подобия (для асфальтобетонной смеси)

$$(\varepsilon_n + \varepsilon_{nt})_e = \frac{\chi_{\kappa}^e [\sigma; T; P/Q; f; K_y]}{t_{\kappa}} \left\{ \chi_o^e \left[\int_0^{t_{\kappa}} K_e(t-\tau) \tau d\tau + 2t_{\kappa} \int_{t_{\kappa}}^{2t_{\kappa}} K_e(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{2t_{\kappa}}\right) d\tau \right] - \chi_{oOB}^e \cdot t_{\kappa} \cdot \left[1 + \int_{2t_{\kappa}}^{2t_{\kappa}+t_p} T_e(t-\tau) d\tau \right] \right\}, \quad (20)$$

где T – температура асфальтобетонной смеси; K_y – коэффициент уплотнения; P/Q – относительная вынуждающая сила вибровозбудителя колебаний вальца; f – частота вибрации; χ_o – коэффициент подобия между базовой и теоретической кривыми ползучести.

При условии постоянства параметров вибрации и одинаковых конструктивных (геометрических) параметрах статического и вибрационного катков, а также при условии

$$(\varepsilon_n + \varepsilon_{nt})_{cm} = (\varepsilon_n + \varepsilon_{nt})_e \quad (21)$$

выражение (11) примет вид

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\kappa}}{\sigma}, \quad (22)$$

где σ_{κ} – максимальные контактные давления, развивающиеся под вальцом статического катка, МПа; σ – максимальные контактные давления, развивающиеся под вальцом виброкатка с включенным вибратором, МПа.

Итак, разработан следующий алгоритм расчета основных параметров применяемых виброкатков и их технологических режимов работы с учетом параметров состояния слоев уплотняемых материалов:

- определив предел прочности слоя опорного основания, по выражению (7) находят рациональное значение максимальных контактных давлений под вальцом статического катка;

- зная радиус, ширину вальца, а также задавшись скоростью катка, определяют время воздействия вальца на слой по выражению (8);

- задавшись постоянными параметрами вибрации виброкатка при выполнении условия (21), с помощью выражений (19), (20), (22), (13) и (14) определяют необратимую деформацию слоя, коэффициент эффективности виброкатка, его линейное давление и массу.

Таким образом, на основе нового реологического подхода с применением теории наслед-

ственной ползучести, зная изменение физико-механических характеристик уплотняемого слоя во времени, можно определить параметры и технологические режимы работы статического катка и виброкатка, при которых обеспечивается наибольшая эффективность уплотнения дорожно-строительных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация /М.А.Колтунов.- М.: Высшая школа, 1976. 278с.
2. Хархута Н.Я. Выбор типа и режима работы катков при уплотнении асфальтобетонных смесей /Н.Я.Хархута, А.А.Шестопапов // Автомобильные дороги. 1983. № 3. С.24-25.
3. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог /Н.Я.Хархута, Ю.М.Васильев. М.: Транспорт, 1975. 286 с.
4. Тейнер Ю. Исследование процессов уплотнения несвязных и связных грунтов прицепными и самоходными катками с гладкими вальцами /Ю.Тейнер. М.: ВНИИСтройдормаш. № 3550. 1960. 21 с.
5. Зубанов М.П. Некоторые вопросы теории и расчета вибрационных катков /М.П.Зубанов // Научно-технический информационный бюллетень ЛПИ.- 1954. № 4.
6. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов /Н.Я.Хархута.- М.-Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.
7. Вибрации в технике: справочник: в 6 т./ ред. совет : В.Н.Челомей (пред., гл.ред.) [и др.]- М.: Машиностроение. Т. 2 . Колебания нелинейных механических систем /И.И.Блехман [и др.]; под ред. И.И.Блехмана, 1979. 351с.