

Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vols. 701-702. – pp. 715–720.

10. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes / Y.S. Kim, etc. // Industry Applications Conference. – 2003. – Vol. 1. – pp. 262–269.

11. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, etc. // Journal of Vibration and Control. – 2010. – № 16. – pp. 477–501.

12. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // European Journal of Control. – 1999. – No. 5. – pp. 208–218.

13. Denisenko, V.V. Varieties of PID-regulators / V.V. Denisenko // Automation in the industry. – 2007. – № 6. – pp. 45-50.

14. Mitchell, Tom M. Machine Learning. – WCB/McGraw-Hill, 1997. – 414 p.

Корытов Михаил Сергеевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО

«СибАДИ»(644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kms142@mail.ru)

Щербakov Виталий Сергеевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВО «СибАДИ»(644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org)

Mikhail S. Korytov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of a university department “Automobiles, construction materials and technologies”, The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, pr. Mira, 5, e-mail: kms142@mail.ru)

Vitaliy S. Sherbakov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Automation of industrial processes and electrical”, The Siberian Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, pr. Mira, 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org)

УДК 629.084

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЕНИЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАБОЧИМ ОРГАНом ДОРОЖНОЙ МАШИНЫ В РАМКАХ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В.В. Михеев¹, С.В. Савельев²

¹*Омский государственный технический университет (СибАДИ), Россия, г. Омск*

²*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Россия, г. Омск*

Аннотация. В статье обсуждается вопрос моделирования процесса взаимодействия активной области грунтового слоя с рабочим органом уплотняющей дорожной машины, рассматриваемого в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров. Предложена математическая модель, эффективно описывающая динамику вещества грунтового слоя при уплотнении. Рассмотрена возможность ее реализации в виде численного алгоритма. Сущность модифицированного подхода сосредоточенных параметров, уплотняемого грунтового слоя, заключается в том, что деформируемый слой делится на несколько разных, вертикально расположенных элементов, описываемых соответствующими реологическими моделями. Основное преимущество такого подхода заключается в возможности достаточно точного описания нелинейных деформационных процессов в зависимости от глубины прорабатываемой грунтовой среды.

Ключевые слова: уплотнение грунтов, сосредоточенные параметры, моделирование, механические свойства, жесткость, упруговязкопластичная среда.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи повышения эффективности процесса уплотнения грунтов в дорожном строительстве требуют для своего решения развития методов описания взаимодействия рабочего органа дорожной машины с уплотняемой средой. Традиционно для этого используются модельные представления, учитывающие механо-реологические особенности уплотняемых сред. Ниже будет представлена формализованная модель взаимодействия рабочего органа дорожной машины с эффективным объемом слоя грунтовой среды в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров, учитывающего особенности развития напряженно-деформированного состояния в слое упруговязкопластичной среды при поверхностном нагружении. Также предлагаемый подход принимает во внимание изменение с величиной поверхностной деформации массы активной области грунта, увлекаемой в движение рабочим органом. Это может иметь место в случае деформируемого рабочего органа в случае плоского пятна контакта, а также жесткого рабочего органа цилиндрической или иной формы, когда форма пятна контакта не может считаться плоской. Решение указанной задачи можно построить в рамках Лагранжева формализма классической механики, позволяющего учесть связи и наличие диссипативных сил, с дальнейшим обобщением на силы сухого трения, реализующиеся при пластическом деформировании области грунта, обеспечивающие накопление остаточных деформаций уплотняемым слоем среды. Преимуществом предлагаемого подхода является более точный учет характеристик грунтовой среды и естественность выбора величин областей слоя с различными характеристиками по отношению к особенностям развития в них напряженно-деформированного состояния при поверхностном динамическом воздействии со стороны рабочего органа уплотнителя.

Аналогичный подход был развит в работе [1] в случае постоянного размера пятна контакта и величин областей грунтового слоя, выбираемых исследователем произвольно. Следует отметить, что при этом были достаточно точно выявлены закономерности процесса вибрационного уплотнения грунтового слоя рабочим органом изменяемой жесткости, подтвержденные экспериментально [2]. Более детальный анализ ситуации требует обобщения подхода к задаче о движении активной области слоя под воздействием уплотняющей

силы, что позволит расширить спектр рассматриваемых зависимостей внешней силы от времени, выявив наиболее эффективные с точки зрения накопления необратимых деформаций грунтом режимы внешнего динамического воздействия, максимально учитывающие эволюцию характеристик слоя грунтовой среды с уплотнением.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «РАБОЧИЙ ОРГАН-ГРУНТ» В РАМКАХ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

На первом этапе моделирования рассмотрим описание взаимодействия рабочего органа с единственным участком среды, обладающим жесткостью, вязкостью и массой, сосредоточенной в его центре тяжести, а также с возможностью перехода к пластическому деформированию при достижении силой известного значения, определяемого предельными параметрами грунтовой среды. Характеристики указанного участка среды – эффективного объема или активной области предполагаются непостоянными и зависящими от текущего значения величины деформации слоя явно или неявно, в общем случае нелинейным образом. Кроме этого модель должна обладать «памятью», то есть учитывать «историю» уплотнения, что может быть сделано принудительно, введя функциональные зависимости для модулей упругости, деформации и коэффициента динамической вязкости среды от плотности, которой обладает среда к заданному моменту времени. Традиционно эти характеристики выбираются зависящими от безразмерного коэффициента уплотнения среды. Это позволяет не конкретизировать тип среды, его гранулометрический состав, содержание воды и т.д. Однако проводить описание движения активной области среды, используя в качестве координаты коэффициент уплотнения, в рамках предлагаемого подхода не представляется целесообразным в силу нескольких факторов:

- коэффициент уплотнения является интегральной характеристикой процесса уплотнения и зависит от величины накопленной грунтовым слоем пластической деформации за всю предшествующую историю уплотнения;
- значение текущего коэффициента уплотнения для активной области грунтового слоя сложным образом зависит от величины деформации в заданный момент времени, что существенно усложняет уравнения, получающиеся в результате моделирования;

- коэффициент уплотнения является величиной, которую практически невозможно измерить в реальном времени при проведении экспериментальной проверки результатов моделирования.

Рабочий орган будем рассматривать также в рамках подхода сосредоточенных параметров, считая в общем случае обладающим конечными жесткостью и вязкостью, также нелинейно зависящей от величины деформации. Переход к жесткому рабочему органу при этом не представляет сложности, кроме этого предложенный подход позволяет органично включить в рассмотрение действие на грунт при уплотнении со стороны рамы дорожной машины и ее подвески.

В качестве уравнения движения активной области грунтового слоя будем рассматривать получающееся из принципа наименьшего действия уравнение Эйлера-Лагранжа [3] для одномерного движения материальной точки, моделирующей сосредоточенную массу активной области. Воспользуемся подходом, позволяющим реализовать как диссипативные силы вязкого трения, возникающие при движении грунта, так и силу сухого трения, описанным в [4].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = F(x, \dot{x}, t) + F_{mp}, \quad (1)$$

где $T(x, \dot{x}) = \frac{m(x)\dot{x}^2}{2}$ - кинетическая энергия

активной области грунта, $F(x, \dot{x}, t)$ – силы, действующие на грунт, как внешние, обусловленные внешним динамическим нагружением со стороны рабочего органа, так и внутренние

силы упругости и вязкого трения, F_{mp} – отдельно выделенная сила трения, моделирующая элемент пластичности, включающийся при превышении контактным напряжением величины, определяемым пределом текучести грунта. Теория предельных состояний допускает кратковременное превышение контактным напряжением значения, соответствующего пределу прочности образца без перехода к разрушению [5]. Необходимо отметить, что при переходе к пластическому деформированию упругая составляющая силы сопротивления исчезает, так что сила сопротивления становится постоянной. Здесь предполагается, что обобщенная координата x представляет собой смещение по отношению к положению равновесия центра масс активной области, функционально связанное со смещением по-

верхности слоя при динамическом воздействии.

Отличием предлагаемого подхода от традиционного выступает рассмотрение динамики массы эффективного объема грунта с деформированием, вызванное изменением площади пятна контакта из-за деформации рабочего органа, что имеет место, например, в случае пневмошинных вальцов, или, вызванное не только изменением площади пятна контакта, но и изменением ее формы, как в случае рабочего органа конечного радиуса кривизны. В этом случае правая часть выражения (1) с учетом принятых допущений примет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{d}{dt} (m(x)\dot{x}) - \frac{\partial m(x)}{\partial x} \frac{\dot{x}^2}{2} = m(x)\ddot{x} + \frac{\partial m(x)}{\partial x} \frac{\dot{x}^2}{2}, \quad (2)$$

демонстрируя по сравнению с уравнением движения для эффективного объема постоянной массы, построенного в [1]. Даже в том случае, если масса активной области слоя грунтовой среды изменяется с деформацией слабо, так что производной по координате можно пренебречь, собственно зависимость массы от смещения, достаточно сложная даже в простых ситуациях, сильно усложняет уравнение движения. Примером этого может служить случай жесткого вальца в форме кругового цилиндра, рассмотрение взаимодействия которого с грунтовым слоем имеет широкое практическое приложение.

Упругая или квазиупругая сила сопротивления слоя упруговязкопластичной среды при поверхностном нагружении также предполагается в общем случае нелинейной по деформации. Нелинейная зависимость силы от деформации моделируется зависящей от величины смещения жесткостью грунта

$$F_{yup} = c(x)x, \quad (3)$$

остающейся главной линейной частью по малому смещению x при вычислении силы в потенциальном поле упругости в лагранжевом формализме

$$U_{yup} = \frac{c(x)x^2}{2},$$

которая дает в общем случае выражение

$$F_{упр} = c(x)x + \frac{\partial c(x)}{\partial x} \frac{x^2}{2}, \quad (4)$$

переходящее в (3) при слабой зависимости жесткости эффективного объема от смещения и возможности пренебречь вторым слагаемым.

Дальнейшее моделирование упругих свойств грунтовой среды требует учета следующих экспериментальных фактов:

1) В зависимости от характера нагружения упругие свойства грунтового слоя изменяются – при разгрузке (убывании напряжений, обусловленных внешними силами) сила сопротивления зависит только от упругой составляющей модуля деформации, а при нагружении – от модуля полной деформации. Отметим, что для применяемых в дорожном строительстве супесчаных и суглинистых грунтов модуль упругости составляет в модуле деформации долю 0.1-0.3

2) После снятия деформирующего воздействия грунтовой слой не испытывает отрицательных деформаций – сосредоточенный жесткий элемент, моделирующий грунт не испытывает растяжения.

Указанные свойства можно учесть при моделировании, введя для описания упругих свойств грунтовой среды следующие соотношения:

$$\sigma_{def} = E\varepsilon, E = (E_{pl}\theta(\dot{\sigma}) + E_{el})\theta(\sigma_{pl}), \quad (5)$$

где E_{pl} - модуль пластической деформации среды слоя, E_{el} - модуль упругой деформации среды слоя, $\dot{\sigma}$ – скорость нарастания напряжений, характеризующая нагружение,

$\theta(z)$ - θ – функция Хевисайда, σ_{pl} - предел пластичности среды слоя. Для перехода к сосредоточенным элементам это эквивалентно переходу к силе сопротивления и жесткостям для пластической и упругой деформации:

$$F_{def} = c(x)x, c(x) = (c_{pl}(x)\theta(\dot{\sigma}) + c_{el}(x))\theta(\sigma_{pl}). \quad (6)$$

Способы вычисления сосредоточенных жесткостей для различных форм активной области и вида пятна контакта приведены в предыдущих параграфах. Следует указать, что жесткости вычисляются таким образом, чтобы

сила квазиупругого сопротивления зависела от смещения центра масс активной области, а не от смещения поверхности грунта.

Вязкое сопротивление активной области грунтовой среды, моделируемое элементом вязкого трения, описывается определяющим соотношением

$$\sigma_{visc} = \eta\dot{\varepsilon},$$

приводящим к известному выражению для сосредоточенной вязкости

$$F_{visc} = b(x)\dot{x},$$

причем необходимо отметить, что зависимость от смещения поверхности грунтового слоя, и, соответственно, от смещения его центра масс у сосредоточенной вязкости выражена слабо. Это объясняется тем, что площадь боковой поверхности активной области, от которой зависит сила вязкого трения, меняется медленно при смещении поверхности грунтового слоя.

Пластическое деформирование без восстановления испытывается средой при превышении контактным напряжением значения предела текучести, характерного для текущего состояния упруговязкопластичной среды слоя. В рамках представляемой модели оно учитывается введением в систему сосредоточенных параметров, описывающих активную область грунтового слоя элемента сухого трения, порождающего при условии

$$\sigma(t) \geq \sigma_{pl}, \quad (7)$$

где $\sigma(t)$ - текущее значение контактного давления, постоянную силу сопротивления, не зависящую от величины деформации с одновременным прекращением действия упругих или квазиупругих сил (5), (6). Для той области грунтового слоя, в которой условие (7) выполняется, сила сопротивления может быть представлена в виде

$$F_{fr}(t) = S_{cont}(t)\sigma_{pl},$$

где $S_{cont}(t)$ - площадь пятна контакта рабочего органа уплотнителя и поверхности грунтового слоя.

Таким образом, уравнение движения участка активной области грунтового слоя в общем виде (2) может быть переписано с учетом модельных допущений, описанных выше

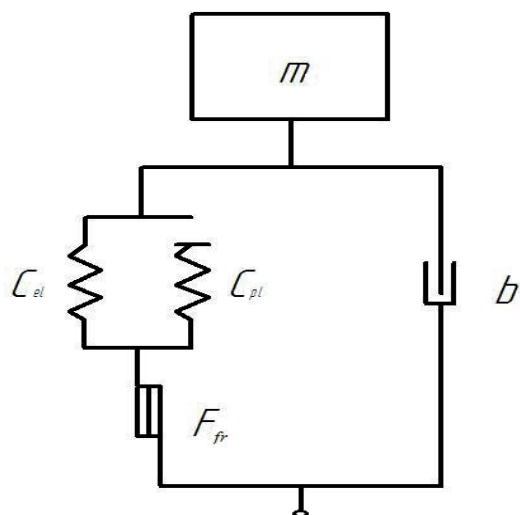


Рисунок 1 – Однотельная модель активной области грунтового слоя при взаимодействии с рабочим органом уплотнителя

$$\begin{aligned}
 m(x)\ddot{x} + \frac{\partial m(x)}{\partial x} \frac{\dot{x}^2}{2} &= -(c_{pl}(x)\theta(\dot{\sigma}) + \\
 &= -(c_{pl}(x)\theta(\dot{\sigma}) + c_{el}(x))(1 - \theta(\sigma_{pl}))x - \\
 &\cdot -b(x)\dot{x} - \frac{\dot{x}}{|x|} \theta(\sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} + F_{ext}(t) \quad (8)
 \end{aligned}$$

Здесь $F_{ext}(t)$ - внешняя сила, воздействующая на поверхность грунтового слоя со стороны уплотнителя, зависимость которой от времени определяется технологическими особенностями устройства и, с точки зрения моделирования, является варьируемой для достижения максимальной эффективности уплотнения. С точки зрения подхода сосредоточенных параметров предлагаемая модель активной области грунтового слоя моделируется однотельной конфигурацией, представляющей комбинацию нелинейного тела Ньютона, нелинейного тела Гука с отключаемой жесткостью по отношению к характеру поверхностного нагружения и тела Прандтля, как показано на рис. 1. Построенная модель является удобной для исследования и эффективно иллюстрирует процесс уплотнения для различных типов внешнего воздействия.

Для перехода к многотельной модели, описанной в предыдущих главах, модель требует дополнения, учитывающего различный характер послойного деформирования участков толщи грунтовой среды. Многотельная модель

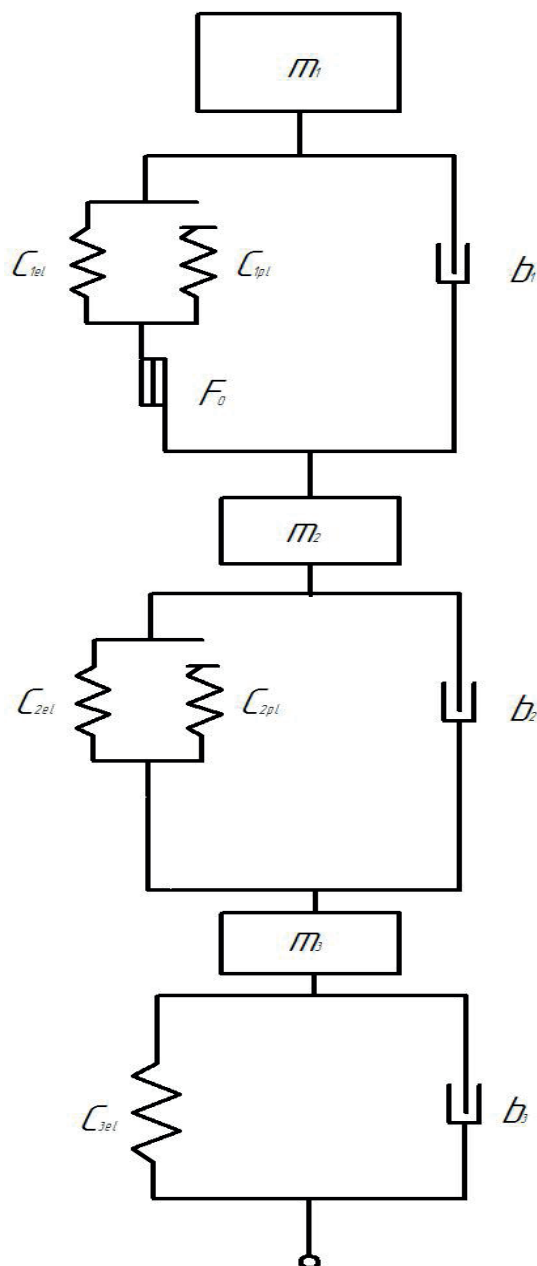


Рисунок 2 – Трехтельная модель активной области грунтового слоя при взаимодействии с рабочим органом уплотнителя

должна строиться с учетом различного характера развития напряженно-деформированного состояния участков грунтового слоя.

Общий вид уравнения движения (8) для каждого из участков грунтовой среды может быть модифицировано с учетом их взаимодействия и отклика на деформирующее воздействие.

Величинами, определяющими силу квазиупругого сопротивления последовательно взаимодействующих участков грунтового слоя, в

таким случае будут не собственно смещения центров масс участков относительно начального положения, определяемого параметрами модели, а относительные смещения смежных слоев.

Схематичное описание многотельной модели, характерной для представления взаимодействия активной области грунтового слоя с рабочим органом уплотнителя представлено на рис. 2.

Предложенная многотельная модель порождает систему дифференциальных уравнений, требующую совместного решения для определения величины накопленной пластической деформации. Индекс РО ниже относится к рабочему органу уплотнителя индексы 1,2,3 – к участкам активной области слоя грунта, находящегося под внешним силовым воздействием.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO}\ddot{x}_{PO} = -c_{PO}(x_{PO})(x_{PO} - x_2) - b_{PO}(x_{PO})\dot{x}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(x_1)\ddot{x}_2 + \frac{\partial m_1(x_1)}{\partial x_1} \frac{\dot{x}_1^2}{2} = \\ = c_{PO}(x_{PO})(x_{PO} - x_1) - b_1(x_1 - x_2)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{|\dot{x}_1 - \dot{x}_2|} \theta(\sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} \\ m_2(x_2)\ddot{x}_2 + \frac{\partial m_2(x_2)}{\partial x_2} \frac{\dot{x}_2^2}{2} = \\ = \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{|\dot{x}_1 - \dot{x}_2|} \theta(\sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - (c_{2pl}(x_2)\theta(\dot{\sigma}) + c_{2el}(x_2))(1 - \theta(\sigma_{pl}))(x_2 - x_3) - b_2(x_2 - x_3)(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ m_3(x_3)\ddot{x}_3 + \frac{\partial m_3(x_3)}{\partial x_3} \frac{\dot{x}_3^2}{2} = \\ = (c_{2pl}(x_2)\theta(\dot{\sigma}) + c_{2el}(x_2))(1 - \theta(\sigma_{pl}))(x_2 - x_3) - c_{3el}(x_3)x_3 - b_3(x_3)\dot{x}_3 \end{array} \right. \quad (9)$$

В этой системе уравнения отвечают последовательно рабочему органу, области грунта, испытывающей нагрузку, создающую механические напряжения, обеспечивающие пластические деформации без реализации упругой силы сопротивления, области грунта с различными упругими свойствами для нагружения и разгрузки, и области слоя с идентичными упругими свойствами для нагружения и разгрузки.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ МНОГОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Система уравнений (9) является нелинейной и требует для своего решения применения численных методов. Следует отметить, что для исследования процесса накопления пластических деформаций толщей слоя грунта при поверхностном нагружении важную роль играет как собственно эволюция поверхности грунта при воздействии уплотняющего усилия, так и перераспределение характеристик участков активной области грунтового слоя. При этом интерес представляет не только величина пластической деформации, накопленная к заданному моменту времени, но и средняя за период приложения воздействия деформация, позволяющая определить скорость пластического деформирования. Эта величина позволяет судить об эффективности процесса уплотнения и ее исследования в зависимости от характера режима внешнего воздействия и особенностей рабочего органа позволяют сделать рекомендации по обоснованию выбора режима уплотнения и характеристик рабочих органов уплотнителей.

Для нахождения решения системы (9) предлагается использовать алгоритм, учитывающий следующие предварительные соображения.

1. Характеристики активной области (эффективного объема) уплотняемого слоя грунта можно определить аналитически или численно.

2. Физико-механические и деформационные характеристики рамы уплотнителя, рабочего органа и генератора поверхностного динамического воздействия считаются известными. Зависимость внешней силы $F_{ext}(t)$ задана.

3. Процессы в толще слоя будем считать квазистационарными, так что значение силы внешнего воздействия передается в толщу слоя без задержки. Для статических режимов нагружения такое приближение является допустимым без оговорок. Для случая вибрационного уплотнения предел применимости приближения лежит в диапазоне толщины слоев, меньших по сравнению с длиной упругих волн, возбуждаемых в толще грунта.

Выбор шага по времени является важным ходом в процессе реализации разностной схемы, осуществляющей численное решение системы (9). Переход к конечным приращениям в рамках предложенной схемы можно построить традиционно [6], представив производные смещений первого и второго порядка в виде отношения конечных величин

$$\dot{x}_i^{(k+1)} = \frac{x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}}{\Delta t}$$

$$\ddot{x}_i^{(k+2)} = \frac{x_i^{(k+2)} - 2x_i^{(k+1)} + x_i^{(k)}}{\Delta t^2},$$

где верхний индекс задается номером интервала в разбиении по времени, отвечая соответствующему шагу разбиения, а нижний индекс – номеру сосредоточенной массы, соответствующей участку активной зоны уплотняемого грунта, характеристики которого зависят от типа реализуемой модели.

Производные входящих в систему величин по координатам (смещениям из положения равновесия), хотя и имеют достаточно сложный вид, но могут быть вычислены без особых затруднений. При использовании для реализации численного алгоритма систем компьютерной алгебры задача становится достаточно легко разрешимой.

Предлагаемый алгоритм можно описать, конкретизируя схему эволюционно модели грунтовой среды, следующим образом (для определенности область контакта рабочего органа со слоем грунта считаем плоской полосой):

1. На первом шаге задаются характеристики рабочего органа и параметры режима поверхностного динамического воздействия на слой грунтовой среды, а также функциональные зависимости характеристики среды от плотности (коэффициента уплотнения);

2. Второй шаг предусматривает определение ширины пятна контакта рабочего органа с поверхностью слоя и вычисления начального значения контактного давления, предшествующего моменту начала динамического воздействия;

3. По значению контактного давления вычисляется количество и физико-механические параметры участков активной зоны грунтового слоя, реализующих различные однотельные модели;

4. Строится система уравнений (9) с учетом результатов, полученных в п.3;

5. Реализуется численная схема интегриро-

вания системы (9), получающаяся переходом к конечным приращениям смещений, причем для каждого последующего момента времени (с учетом шага) производится вычисление параметров участков активной зоны слоя, позволяющее выявить динамику процесса;

6. Данные о величинах смещений участков активной зоны и их характере сохраняются;

7. Определяется накопленная к заданному моменту времени суммарная пластическая деформации грунтового слоя и вычисляется средняя скорость ее накопления;

8. Пересчитываются характеристики среды грунтового слоя с учетом величины накопленной пластической деформации для перехода к следующему циклу воздействия (проходу дорожной машины).

Реализация данного подхода сводит задачу к линейной, поскольку коэффициенты уравнений, способные содержать сложные зависимости от координат входят в уравнения системы, переопределяемые на каждом шаге, в качестве констант, значения которых вычисляется с учетом деформации участков активной области [7].

Помимо указанных величин предлагаемый алгоритм позволяет оценить энергоэффективность процесса уплотнения долей мощности, затрачиваемой на пластическое деформирование слоя.

Необходимо отметить, что помимо средней за цикл скорости накопления пластической деформации

$$\bar{v}_{pl}^{total} = \frac{\Delta x_{pl}^{total}}{\Delta t^{total}}$$

и ее абсолютного значения, в качестве измеряемой величины, показывающей эффективность уплотнения, может быть использована легко вычисляемая скорость накопления

$$v_{pl}^{(i)} = \frac{\Delta x_{pl}^{(i)}}{\Delta t_i},$$

определяемая на *i*-м шаге численного решения системы (9) как отношение пластической деформации, приобретаемой слоем на этом

шаге к шагу по времени Δt_i , определенному при формулировании исходных условий. Эта скорость может быть измерена с использованием устройств непрерывного контроля укатки (уплотнения), применяемых для анализа хода протекания технологического процесса уплотнения в реальном времени, например [8 – 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михеев В.В., Савельев С.В. Исследование влияния деформации адаптивного рабочего оборудования дорожного катка на процесс деформирования уплотняемого грунта // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №7. – С. 45-51.
2. Савельев С.В. Развитие теории и совершенствование конструкций вибрационных катков с пневмошинными рабочими органами: дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / Савельев Сергей Валерьевич. – Омск, 2014. – 326 с. :152 ил.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1973. 208 с. («Теоретическая физика», том I).
4. Козлов В. В. Лагранжева механика и сухое трение // Нелинейная динам. – 2010. – Том 6. – № 4. С. 855–868.
5. Мангушев, Р. А. Механика грунтов : учебник / Р. А. Мангушев, В. Д. Карлов, И. И. Сахаров. – М. : АСВ, 2009 (Курган). – 264 с. : ил.
6. Бахвалов Н. С. Численные методы : учебное пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков,

Г. М. Кобельков; МГУ им. М. В. Ломоносова. – 3-е изд., доп. и перераб. -М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 636 с.

7. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Расчёт распределения напряжений в грунтах с линейным законом изменения плотности по глубине от динамической поверхностной нагрузки // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 1. – С. 40.

8. Михеев В.В., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта. Патент на изобретение №2500855- МПК 02D3/026 (2006.01) E01C19/23 (2006.01) E01C23/07 (2006.01). Заявка №2012121230/03, Заявлено: 23.05.2012; Опубликовано: 10.12. 2013.

9. Тюремнов И.С., Морев А.С. Разработка системы непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2014. – Т. 1. – С. 205-207.

10. Тюремнов И.С., Чабуткин Е.К., Окулов Р.Д. Интеллектуальные катки – интеллектуальное уплотнение // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 8. – С. 2-8.

MODELING OF PROPERTIES OF DEFORMABLE SOIL MEDIA DURING COMPACTION BY CYLINDRICAL ROLLER DRUMS MATHEMATICAL MODELING OF COMPACTION FOR ELASTOVISCOPLASTIC SOIL MEDIA CAUSED BY THE INTERACTION WITH WORK TOOL OF COMPACTING MACHINE IN THE FRAMEWORK OF MODIFIED APPROACH OF LUMPED PARAMETERS

V.V.Mikheyev, S.V.Saveliev

Abstract. *Article deals with the problem of mathematical modeling of mechanical interaction for the system “active volume of the soil layer – work tool of the compactor”. The problem is suggested to be solved in the framework of the modified approach of lumped parameters. Effective mathematical model was constructed and possibility of its numeric realization was discussed.*

Keywords: *soil compaction, rigid drum, modeling of mechanical properties, soil stiffness, elastic-viscous-plastic media.*

REFERENCES

1. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Investigation of influence of deformation of adaptive work tools of a roller on deformation processes in the soil // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. №7, 2013. -С. 45-51
2. Saveliev S.V. Development of theory and advancement of design for vibratory road rollers with pneumatic work tools: doctor of technical

science thesis – Omsk, 2014.

3. Landau L.D., Livshits I.M. Mechanics. Nauka, 1973. 208 P. («Theoretical physics», vol. I).

4. V.V.Kozlov Lagrange mechanics and dry friction //Nonlinear dynamics, 2010, vol. 6, № 4, pp. 855–868

5. R. A.Mangusev, V.D. Karlov, I.I. Sakharov. Soil Mechanics. ASV, 2009 – 264 P.

6. N.S.Bakhvalov, N.P. Zhidkov, G.N. Kobelkov. Numeric methods, BINOM. 2004. -636 P.

