

Выводы

1. Более экономичным является второй узел по сравнению с первым. Это выражается в первую очередь меньшей металлоемкостью, так как количество нагелей меньше для второго варианта. Во-вторых, меньшей трудоемкостью в устройстве, потому что проще устроить отверстия, находящиеся на одной линии, чем для окружности. В-третьих, в элементах второго узла возникают меньшие напряжения, чем в элементах первого.

2. Первый узел является архитектурно выразительным, поэтому его можно использовать при возведении зданий для культурно-массовых и зрелищных мероприятий и спортивных сооружений, так как он может лучше вписаться в эстетичный вид сооружения.

Список цитированных источников

1. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.05-146-2009 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2009. – 63 с.

2. Деревянные конструкции. Правила расчета: ТКП 45-5.05-275-2012 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск: РУП «Минсктиппроект» 2012. – 111 с.

3. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП П-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.

4. Фомичев, В.Ф. «Методические указания по расчету и конструированию узловых соединений по курсу «Конструкции из дерева и пластмасс» / В.Ф. Фомичев, В.В. Саяпин, А.В. Оковитый, В.А. Иванов. БГПА – Минск: 1993. – 63 с.

5. Кормаков, Л.И. Проектирование клееных деревянных конструкций / Л.И. Кормаков, А.Ю. Валентинавичюс. – Киев: Будивельник. – 1983. – 152 с.

6. Проектирование деревянных конструкций: учебное пособие / Е.Н. Серов, Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под ред. Е.Н. Серова. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 536 с.

УДК 69.04+624.151.5:519.673

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SIMULIA ABAQUS

Клебанюк Д. Н., Пойта П. С., Шведовский П. В.

Введение. Интенсивное ударное уплотнение грунтов основано на использовании энергии ударных воздействий, прикладываемых к поверхности грунтового массива сбрасыванием трамбовок массой от 7,0 до 200,0 тс с высоты 10,0...40,0 м. При этом глубина уплотняемой толщи может достигать от двух-трех до нескольких десятков метров. Таким способом могут быть уплотнены многие материалы – от гравийно-галечниковой массы, каменной наброски и строительного мусора до иловатых глин и торфов.

Можно выделить два основных метода интенсивного глубинного уплотнения: метод ударного разрушения и метод динамической консолидации [1, 2].

Метод ударного разрушения применим для различных видов грунтов с относительно небольшим водонасыщением. Уплотнение происходит под воздействием передающейся на поверхность массива энергии удара, обуславливающим взаимное перемещение частиц грунта. При этом в зависимости от вида и

состава грунтов, их плотности и влажности часть энергии расходуется на уплотнение, а часть поглощается грунтом за счет упругих деформаций, т. е. происходит разрушение существующей структуры грунта и создание новой.

Метод динамической консолидации применяется обычно для глубинного уплотнения обводненных грунтов, т. е. когда, для достижения требуемой плотности, необходимо добиться отжатия поровой воды, не вызывая дополнительных деформаций основания, и соответственно стабилизировать несущую способность грунта на новом уровне, превышающем исходный.

Для поверхностного уплотнения грунтов и вытрамбовывания котлованов под фундаменты чаще всего применяются трамбовки массой 3,0...6,0 тс и диаметром основания 0,7...1,8 м, сбрасываемые с высоты 3,0...9,0 м. При этом толщина уплотненного слоя, в котором значительно повышаются деформативные и прочностные характеристики грунта, а в просадочных кроме уплотнения устраняются еще и просадочные свойства, составляет от 1,0 до 3,0 м.

Данные, полученные в результате выполнения работ по уплотнению грунтов с применением трамбовок массой 7,0...16,0 тс и диаметром основания 2,0...3,0 м, сбрасываемых с высоты 7,0...10,0 м, в странах СНГ и ближнего зарубежья, позволяют сделать следующие выводы [2, 3, 4, 5]:

- глубина зоны уплотнения, на которой плотность грунтов в сухом состоянии превышает исходную (до уплотнения) не менее чем на 0,02...0,03 тс/м³, составила 4,0...6,0 м, т.е. $2,0...2,5d_{mp}$ (d_{mp} – диаметр основания трамбовки);

- толщина достаточно уплотненного слоя (для просадочных грунтов) равнялась 3,0...4,0 м, т.е. $1,2...1,7d_{mp}$. Эти показатели почти в 1,5 раза выше, чем в случае применения трамбовок массой до 6,0 тс.

Значительные объемы работ по уплотнению грунтовых оснований тяжелыми трамбовками выполнялись и в нашей республике (г. Могилёв, Гомель, Брест) при строительстве крупных предприятий и объектов социального назначения [1, 6, 7].

На большинстве объектов применялись трамбовки массой 10,0...16,0 тс. Трамбовки представляли собой усеченный конус или шестигранную призму с металлическим корпусом (с заполнением тяжелым бетоном) высотой от 2,7 до 4,0 м, диаметром подошвы 1,2... 1,3 м и диаметром верха – 1,4... 1,5 м.

Анализ полученных данных для связных и рыхлых грунтов (таблица 1) показывает, что влажность супеси пластичной уменьшается в 1,11 раза, а песка пылеватого – в 1,14 раза. Плотность сухого грунта увеличивается соответственно в 1,18 и 1,12 раза. Если оценивать состояние грунта по его коэффициенту пористости, то супесь пластичная уплотняется в 1,55 раза, а песок пылеватый – в 1,34 раза. Происходит довольно существенное увеличение угла внутреннего трения. Для супеси значение угла внутреннего трения (φ) возрастает в 1,26 раза, для песка пылеватого – в 1,16 раза. Вместе с тем величина удельного сцепления (c) значительно уменьшается: для супеси – в 5,5 раза и для песка пылеватого – в 5,0 раз.

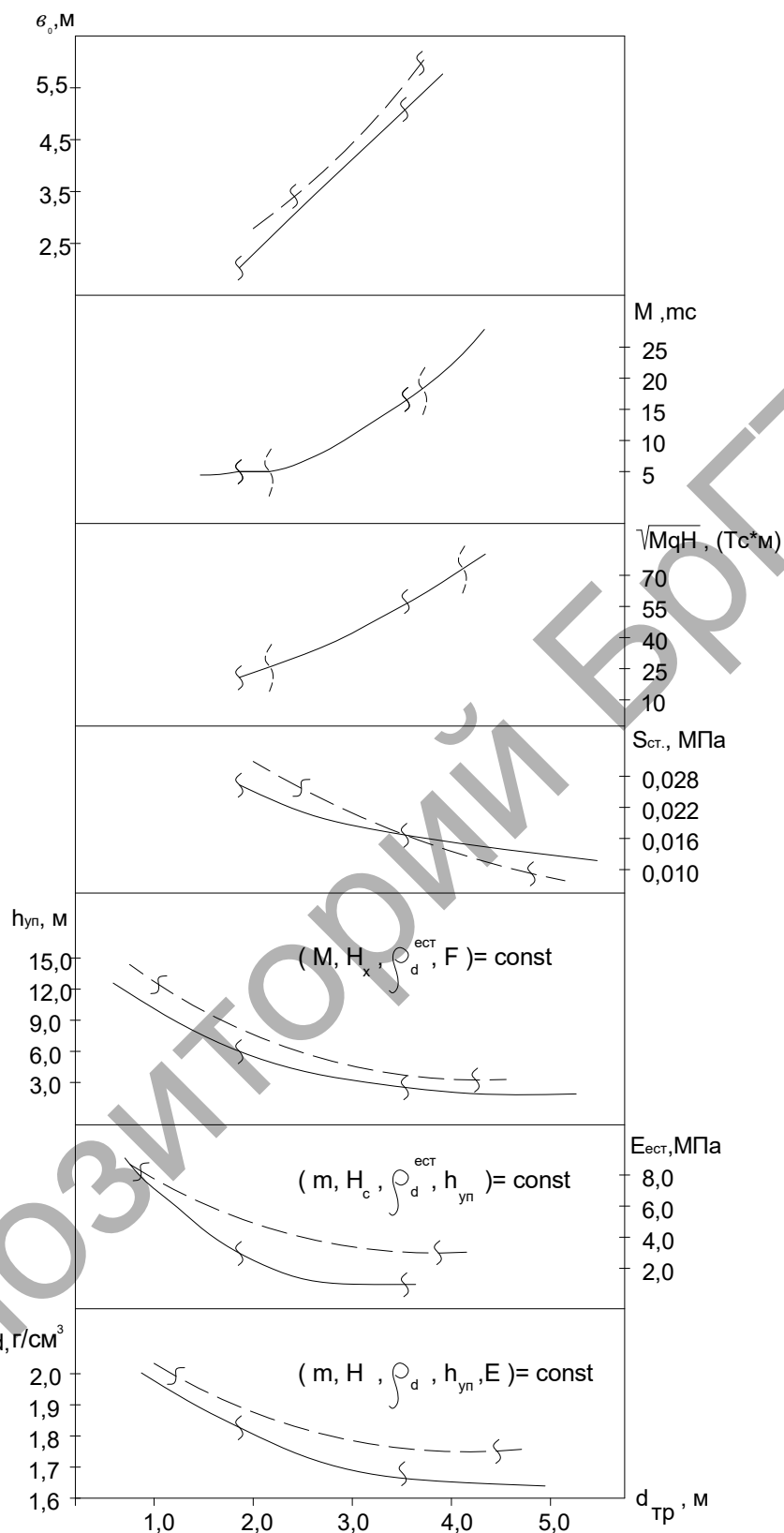
Весьма важным является и увеличение модуля деформации грунта для супеси в 4,0 раза, для песка пылеватого – в 2,1 раза.

Таким образом, очевидны перспективы и реальные технические возможности динамического уплотнения для осуществления весьма эффективного метода подготовки слабых оснований с самым широким диапазоном грунтов по своим свойствам: от переувлажненных рыхлых, содержащих растительные остатки, грунтов до моренных отложений.

Взаимосвязи конструктивно-технологических параметров уплотняющих механизмов и их влияние на изменения состояния грунтов для трамбовок с плоскими и сферическими формами подошв представлены на рисунке 1.

Таблица 1 – Изменение характеристик грунтов по результатам уплотнения ($n=10$ ударов)

Наименование и состояние грунтов	Характеристики грунтов	W, %	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	e	φ , град.	C, кПа	E, МПа (P=150...300 кПа)	
								компрессионные испытания	штамповые испытания
Супесь пластичная, естественное состояние	До уплотнения	23	1,87	1,52	0,76	21	22,0	5,2	4,2
	После уплотнения	21,1	2,18	1,80	0,49	26,5	4,0	11,3	16,8
	Изменение характеристик грунтов после уплотнения, раз	1,11	1,17	1,18	1,55	1,26	5,5	2,17	4,0
	При оптимальной влажности	10	1,79	1,83	0,47	-	-	-	-
Песок пылеватый с глинистыми включениями	До уплотнения	15,1	1,79	1,56	0,71	32	10,0	6,8	10,4
	После уплотнения	13,2	1,96	1,74	0,53	37,2	2,0	14,7	21,3
	Изменение характеристик грунтов после уплотнения	1,14	1,10	1,12	1,34	1,16	5,0	2,16	2,1

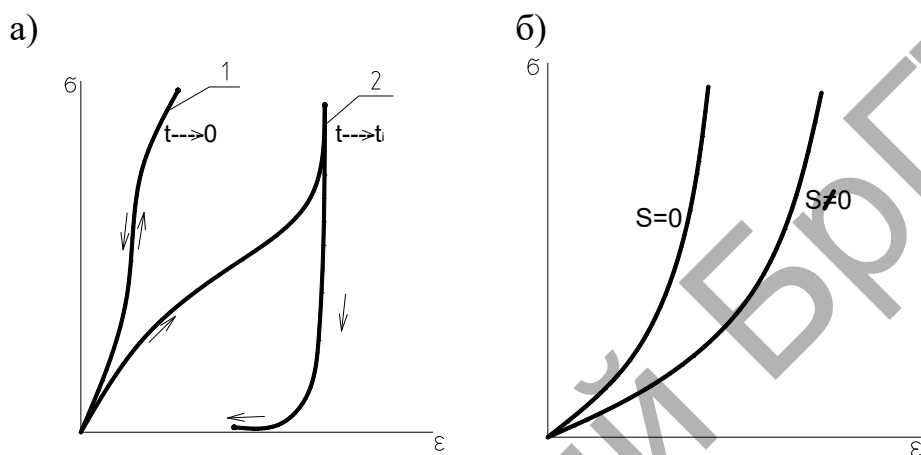


M – масса трамбовки; $h_{уп}$ – мощность уплотняемой зоны; v_0 – расстояния между точками трамбования, MgH – энергия одиночного удара; $E_{ест}$ – модуль деформации, $S_{ст}$ – статическое давление на грунт, H – высота сброса;

Рисунок 1 – График взаимосвязи конструктивно-технологических параметров уплотняемых грунтов в зависимости от форм подошвы:
 — — — — плоская; — — — — сферическая; ζ – граница оптимальных значений

Возможные диапазоны расчетных параметров, как видно на графике, достаточно многогранны и широки, что делает насущным не только поиск достоверных теоретических решений, но и разработку геотехнического моделирования (компьютерных моделей) по выбору оптимального варианта конструктивно-технологических параметров трамбовок и прогноза изменений напряженно-деформационного состояния (НДС) уплотняемого грунтового массива.

Анализ теоретических моделей. Общий характер развития объемных деформаций грунтов [4, 5, 8], при различных скоростях приложения и снятия динамической нагрузки, в процессе уплотнения показан на рисунке 2.



а) – грунты естественной влажности; б) – водонасыщенные
Рисунок 2 – Графики связи объемных деформаций (ϵ) с напряжениями (σ)

Из графиков видно, что при очень больших скоростях ($t \rightarrow 0$) для грунтов естественной влажности характерен упругий характер деформирования (кривая 1), а при уменьшении скорости ($t \rightarrow t_i$) характер деформирования (кривая 2) более сложный, т. е. наблюдается «упругое» последствие, за счет восстановления во времени части деформаций. Что касается водонасыщенных грунтов ($S=0$), то их сжимаемость незначительная (кривая 1), но при наличии даже небольшого количества заземленного газа ($S \neq 0$) их сжимаемость существенно повышается (кривая 2).

В наиболее общем виде модель грунта как сжимаемой упруго-пластической среды предложена С. С. Григоряном [8]. Основное ее отличие от моделей теории пластичности состоит в том, что объемная деформация не считается упругой и ее распространение определяется соотношением

$$P = f_i(\rho) \text{ при } \frac{dP}{dt} \geq 0; \quad (1)$$

$$P = f_p(\rho, \bar{\rho}) \text{ при } \frac{dP}{dt} < 0, \quad (2)$$

где $P = \frac{1}{3} \sigma_{ij}$ ($i=1, 2, 3$); ρ – плотность грунта; t – время; P – наибольшее давление, достигнутое при нагружении.

В. В. Соколовским и Л. Е. Малверном [9, 10] предложена более общая реологическая модель, в основе которой скорость изменения напряженного со-

стояния грунтовой среды определяется как функция от превышения действующего динамического напряжения над статическим $f(\varepsilon)$ при той же деформации:

$$E \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \Phi[\sigma - f(\varepsilon)], \quad (3)$$

где $f(\varepsilon) = \sigma_s$ – предел текучести.

Зависимость между сжимающими динамическими напряжениями σ и деформациями ε может быть описана диаграммой, представленной на рисунке 3.

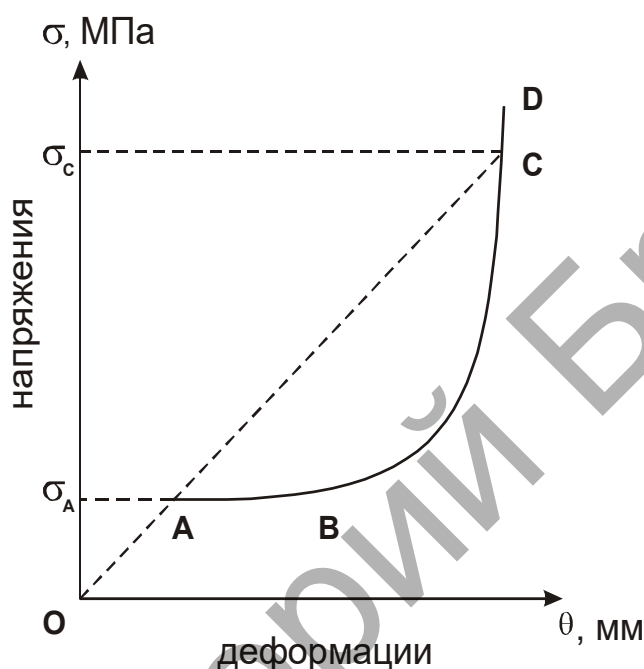


Рисунок 3 – Вид диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при динамическом сжатии

Важнейшим фактором, обуславливающим поведение грунтовой среды при распространении волн сжатия, является знак второй производной функции $\sigma = f(\varepsilon)$. Если $\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} < 0$ (участок OAB), то более высокие напряжения распространяются с меньшей скоростью и профиль волны растягивается во времени. При этих условиях невозможно распространение возмущений, созданных каким-либо внешним источником. Если $\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} > 0$ (участок BCD), то с ростом напряжений скорость их распространения увеличивается, т. е. происходит образование ударной волны. Это означает, что наличие точки перегиба функции $\sigma = f(\varepsilon)$ обуславливает существование различных форм волн сжатия в грунте в зависимости от величины максимального давления.

Следует отметить, что задача об ударе жестким штампом по полупространству, занятому сплошной средой с упруго-пластическими свойствами, в общей постановке является весьма сложной. Л. Р. Ставницер [5], заменив деформируемое полупространство более простой расчетной схемой и используя методы одномерной динамической теории пластичности, получил зависимости, позволяющие определить напряжения и скорости в месте контакта ударяющей массы с поверхностью грунта:

$$\sigma(0,t) = \frac{b_0 A_2}{2A_1} \left[\beta F\left(\frac{gA_2^2}{\sigma_{cm} A_0} t\right) - \alpha F\left(\frac{\xi g A_2^2}{\sigma_{cm} A_0} t\right) \right]; \quad (4)$$

$$v(0,t) = \frac{b_0}{2A_1} \left[\beta F\left(\frac{gA_2^2}{\sigma_{cm} A_0} t\right) + \alpha F\left(\frac{\xi g A_2^2}{\sigma_{cm} A_0} t\right) \right] - \frac{\omega}{A_1} \sigma_s, \quad (5)$$

где $\sigma_{cm} = \frac{mg}{S}$; m и S – масса и площадь основания ударяющего тела, которое по отношению к грунту считается абсолютно жестким; g – ускорение силы тяжести;

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{\alpha}{\beta}; \omega = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \\ \alpha &= \frac{A_2 - A_1}{A_2}; \beta = \frac{A_2 + A_1}{A_2} \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

A_0, A_1, A_2 – скорости при различных значениях t .

Однако эти зависимости справедливы лишь до момента времени, превышающего время пробега пластической волны на время обратного пробега отраженной упругой волной области остаточных деформаций. Более того, все эти теоретические решения не позволяют получить закон распределения остаточных деформаций, расчет которых и является конечной целью.

Следует также отметить, что с ростом скорости удара существеннее сказывается несоответствие принятой расчетной схемы действительному поведению грунта, что при больших скоростях приводит к завышению глубины и степени уплотнения.

Общим недостатком всех теоретических решений является то, что возможность их применения нуждается в подтверждении экспериментальными данными.

Исследованные диапазоны эффективных расчетных параметров (рисунок 1) для конкретных инженерно-геологических условий и требований, предъявляемых к уплотненным грунтовым основаниям, даже с достаточно значимым шагом итерации, требуют для выбора оптимального варианта рассматривать более пятисот вариаций, позволяющих выделить десять доминирующих вариантов. Бесспорно, для современной компьютерной техники это не сложная задача, но выбрать оптимальный проектный вариант даже из десяти доминирующих с неопределенностью числа ведущих параметров очень затруднительно.

Это и обуславливает необходимость геотехнического моделирования, позволяющего осуществлять перебор параметров в процессе моделирования.

Анализ геотехнических моделей. Сложность геотехнического моделирования обуславливается в первую очередь нелинейностью физических процессов при деформировании грунтового основания и, как правило, весьма непростой инженерно-геологической обстановкой (переменные мощности слоёв, выклинивающиеся слои, наличие грунтовых вод). Дополнительную сложность привносит соединение разных, сильно отличающихся масштабом элементов в одной модели. В этом плане программный комплекс SIMULIA ABAQUS предоставляет весьма развитый аппарат для конечно-элементного моделирования, включающий удобный генератор гексаэдральной сетки, широкий спектр моделей упруго-пластического деформирования материалов, возможность работать

с отдельными геометрическими частями области через механизм контактных пар и т. д.

Отметим удобную возможность полного описания модели в ABAQUS CAE на уровне геометрии, включая подразбиение расчетной области на любые подмножества, полное задание свойств подмножеств, выделение любого числа шагов по параметру нагружения, большое число объемных, плоских и одномерных элементов, ассоциируемых с подобластями, с помощью которых можно смоделировать все необходимые геотехнические элементы в зоне уплотнения.

Для рассматриваемой задачи моделирование начинается с построения геологической модели расчетной области, включающей в себя: определение размеров расчетной области; определение глубины расчетной области на основе оценки НДС; аппроксимацию данных инженерно-геологических условий с помощью В-сплайнов или полигональных фасеток; расчет начальной картины НДС.

В качестве модели грунта выбрана упругопластическая модель Друккера-Прагера [11], соответствующая ассоциированному закону пластического течения. Эта модель определяется пластическим потенциалом:

$$F(p, q) = q + \alpha p - k, \quad (7)$$

где $p = I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений;

$q = \sqrt{I_2(D_\sigma)}$ – второй инвариант девиатора напряжений;

T_σ и D_σ – соответственно тензор и девиатор напряжений;

α и k – параметры модели, определяемые при стандартных испытаниях грунтов [11].

Следует отметить, что так как для рассматриваемого класса задач требуется высокий порядок аппроксимации, предполагающий разбиение расчетной области на гексаэдры, то это обуславливает специальный подход к генерации сетки в ABAQUS CAE, предполагающий построение “призматической” сетки с адаптацией к геометрическим элементам (рисунок 5). Здесь используется механизм разбиения начальной геологической модели (рисунок 6) полубесконечно-го полупространства на подобласти с помощью вертикальных поверхностей и управление шагом сетки с помощью задания характерного геометрического размера на ребрах, получаемых в результате такого разбиения подобластей.

Особенности построения сетки связаны с необходимостью вычисления начального НДС в геологической модели расчетной области, что предполагает удаление части элементов на первом шаге. Однако в дальнейших шагах эти элементы реанимируются, и они должны быть заранее предусмотрены в конечно-элементном разбиении расчетной области.

Вне области зоны воздействия трамбовки характерный шаг сетки составляет несколько метров, а зоне – не более 0,7 м.

Рассматриваемый подход к построению конечно-элементного разбиения приводит к гексаэдральной сетке с хорошими вычислительными свойствами, однако порождает большое число конечных элементов, если учитывать инженерно-геологические слои грунта и дополнительные подразбиения горизонтальными плоскостями, с целью выделить область взаимоналожения зон трамбования.

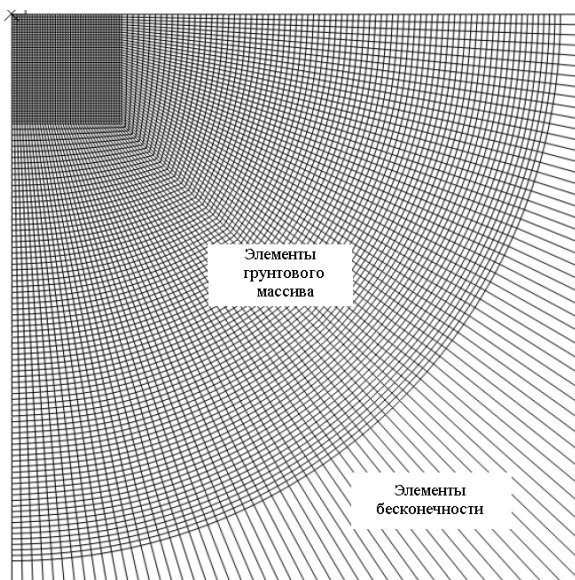


Рисунок 5 – Общий вид модели полубесконечного полупространства

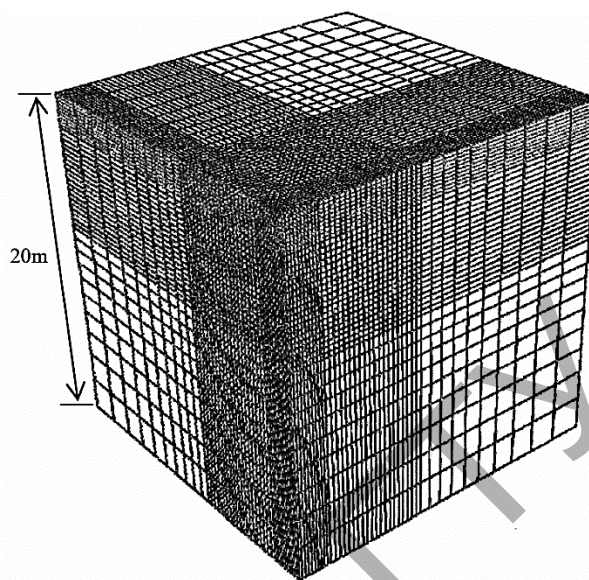


Рисунок 6 – Трехмерная сетка геотехнической модели

Как отмечено [12], точность решения моделирования динамических задач зависит от размера элементов сеток. Удлиненные и острые угловые элементы имеют тенденцию быть более жесткими. Маленькие размеры элементов вызывают числовую нестабильность, а большие – затрудняют распространение более короткой волны, связанной с высокими частотами. При этом приращение времени должно обеспечивать регистрацию волны давления в двух последовательных узлах вдоль зоны перемещения и соответственно: $T=0,0145$ с при скорости распространения первичной волны – 50 м/с; поперечной – 31,6 м/с и волны Релея – 29 м/с.

Моделирование трамбовки обычно осуществляется с использованием осесимметричных жестких элементов с сосредоточенной массой в центре симметрии. Собственно процесс многократного воздействия трамбовки моделируется с помощью модели «сила-время», базируется на модели исходной скоростной волны, с учетом величин напряжения, создаваемых под трамбовкой.

С учетом всех вышеописанных особенностей процесса динамического уплотнения для моделирования принята следующая трехмерная модель с шагом сетки $3R$ (рисунок 7), позволяющая моделировать процессы уплотнения с глубиной отпечатка до $1,5R$, радиусом трамбовки (R) до $1,25$ м и шагом итерации $0,25$ с.

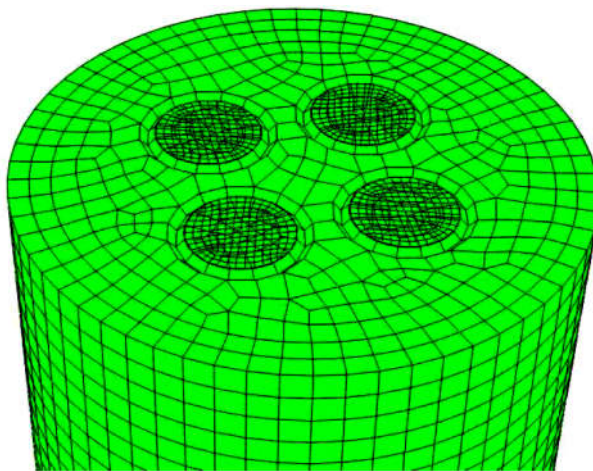


Рисунок 7 – Общий вид трехмерной модели динамического уплотнения

Заключение. Практическая реализация этой геотехнической модели требует проведения дополнительных экспериментов в натуральных условиях, но создание компьютерной модели процесса интенсивного ударного уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками позволит оптимизировать проектные и конструктивно-технологические решения в области устройства искусственных оснований, обеспечивающие не только минимизацию энерго- и ресурсозатрат при строительстве нулевых циклов зданий и сооружений, но и повысить их эксплуатационную надежность.

Список цитированных источников

1. Пойта, П.С. Особенности геотехнических технологий устройства искусственных оснований на застраиваемых территориях со сложными инженерно-геологическими условиями / П.С. Пойта, Д.Н. Клебанюк, П.В. Шведовский // *Механика и технологии* /// Мин. образования и науки Республики Казахстан ; Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати. – 2013. – №4 (42). – С. 97-105.
 2. Швец, В.Б. Уплотнение грунтов оснований тяжелыми трамбовками / В.Б. Швец. – М.: Росстройиздат, 1958. – 162 с.
 3. Клебанюк, Д.Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, П.С. Пойта, П.В. Шведовский // *Вестник Брестского гос. техн. ун-та.* – 2013. – № 1 (79) : Строительство и архитектура . – С. 77-81.
 4. Рабинович, И.Г. Современное состояние и перспективы развития метода уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / И.Г. Рабинович, Ю.А. Багдасаров, В.Г. Галицкий, Ю.М. Лычко, А.Г. Лунев, И.Ю. Ухова // *Труды ВНИИОСПа.* – 1986. – Вып. 85. – С. 22-23.
 5. Ставницер, Л.Р. Расчет остаточных деформаций при ударном воздействии на грунт / Л.Р. Ставницер // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1964. – № 5. – С. 8-12.
 6. Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта // *Вестник Брестского гос. техн. ун-та.* – 2003. – № 1 (62) : Строительство и архитектура . – С. 109-110.
 7. Клебанюк, Д.Н. Особенности процесса распределения давлений и напряжений при уплотнении неоднородных грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, А.Ю. Дроневиц, П.В. Шведовский, П.С. Пойта // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара, Новополоцк, 28-29 ноября 2012 г. : в 2 т. /// Полоц. гос. ун-т ; редкол. : Д.Н. Лазовский [и др.]. – Новополоцк, 2012. – Т. II. – С. 239-244.*
 8. Вуцель, В.И. Динамическое уплотнение грунтов / В.И. Вуцель, Ю.К. Зарецкий, М.Ю. Гарицелов // *Энергетическое строительство за рубежом.* 1983. – №4 – С. 39-41.
 9. Вовк, А.А. Влияние влажности на динамическую деформируемость суглинков / А.А. Вовк, Г.И. Черный, А.В. Михалюк // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1972. – № 3. – С. 6-8.
 10. Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, В. Прагер // *Определяющие законы механики грунтов.* – М.: Мир, 1975. – С. 166-177.
 11. Власов, А.Н. Моделирование задач геомеханики с помощью SIMULA ABAQUS / А.Н. Власов, Д.Б. Волков-Богородский, М.Г. Мнушкин, С.Н. Тропкин // *Труды Международной научно-практической конференции “Инженерные системы - 2009”. Москва, 6-9 апреля 2009. Т. 1. – М. : Изд-во РУДН, 2009. – С. 97-111.*
- Власов, А.Н. Некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью SIMULA ABAQUS / А.Н. Власов, Д.Б. Волков-Богородский, М.Г. Мнушкин, С.Н. Тропкин // *Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2010».* М.: Изд-во РУДН, 2010. – С. 78–88.