

2. Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-22-81* (с изм. №1 и №2 ВУ). – Введ. 01.01.1983 (отменен на территории РБ с 01.01.2018). – Москва : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР, 2015. – 46 с.

3. Structural use of unreinforced masonry: BS 5628-1:2005. Part 1. – Publ. 08.12.2005. – London : BSI, 1992. – 80 p.

4. Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie: PN-B-03002:2007. – Publ. 11.07.2007. – KT 252, Projektowania Konstrukcji Murowych, 2007. – 68 str.

5. Kubica, J. Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi przemieszczeniami podłoża / J. Kubica. – Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003. – 196 s.

6. Кабанцев, О. В. Влияние уровня нормального сцепления на процесс пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев, Э. С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2015. – № 4. – С. 78–89.

7. Демчук, И. Е. Прочность и деформации каменной кладки из керамического кирпича при сдвиге поперек горизонтальных швов / И. Е. Демчук // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – принята к публикации.

8. Демчук, И. Е. Исследование прочности сцепления растворов в каменной кладке / И. Е. Демчук, В. Н. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – № 1(73) : Строительство и архитектура. – С. 71–76.

9. Галалюк, А. В. Влияние прочности раствора при сжатии на величину модуля упругости раствора и коэффициент Пуассона / А. В. Галалюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 100–112.

УДК 624.15+614.8.084+519.95:330.115

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ОПТИМИЗАЦИИ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО УПЛОТНЕНИЯ

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

Аннотация: В статье рассмотрены основные аспекты поиска и выбора оптимальных вариантов процесса уплотнения грунтовых оснований с позиции конструктивно-технологических, организационно-экологических факторов и с учетом инженерно-геологических условий территории.

Предложенная методика, базирующаяся на совокупности статистических методов и моделей, обеспечивает вероятность оптимального выбора факторов процесса уплотнения грунтов не менее $P=0,92$.

Ключевые слова: оптимизация, факторы процесса, уплотнение, грунты, методика.

Илл. 1, табл. 2, библи. назв. 17.

Annotation: In article the main aspects of search and choice of optimal variants of process of consolidation of the soil bases from a position of constructive and technological, organizational and ecological factors and taking into account engineering-geological conditions of the territory are considered.

The offered technique which is based on set of statistical methods and models provides probability of the optimum choice of factors of process of consolidation of soil not less than $P = 0,92$.

Keywords: optimization, process factors, compression, soils, methods.

Ill. 1, tab. 2, bibl. nam. 17.

Введение. Строительство любых объектов на весьма сложных в инженерно-геологическом отношении территориях требует больших дополнительных затрат на проведение объемных мероприятий по их инженерной подготовке.

Практикой отечественного и зарубежного опыта [1–5] доказано, что наиболее рациональным способом подготовки строительных площадок со слабыми основаниями является интенсивное ударное уплотнение грунтового массива тяжелыми трамбовками.

Однако эффективное применение уплотнения грунтов таким методом возможно только при достоверных знаниях исходного состояния уплотняемых грунтов, влиянии конструктивно-технологических параметров и динамики изменения свойств грунтов в процессе после уплотнения.

Имеющиеся исследования [6–9] позволяют установить характер уплотнения по глубине, но не позволяют прогнозировать конкретное улучшение свойств грунта и осуществить прогноз параметров, которые будут получены при уплотнении грунта интенсивными ударными нагрузками. При этом выбор технологических параметров уплотнения (массы трамбовки, высоты сбрасывания, расстояния между соседними точками удара трамбовки) вообще осуществляется на основе результатов пробного уплотнения грунтов на строительной площадке.

Отсутствие методик комплексного учета этих факторов зачастую приводит к неэкономичным решениям по подготовке грунтовых оснований и, соответственно, выбору фундаментных конструкций.

Отсюда детальное выявление основных закономерностей, описывающих процесс уплотнения грунтов, его связь с конструктивно-технологическими параметрами механизма уплотнения и деформационно-прочностными характеристиками искусственных оснований, позволяющих не только качественно запроектировать фундаментные конструкции, но и обеспечить материально- и энергоэффективность их устройства, на сегодня более чем важно и актуально.

Это также позволяет обеспечить повышение уровня надежности и долговечности зданий и сооружений, возведенных на уплотненных грунтовых основаниях.

Постановка задачи. Анализ исследований [5–9] показывает, что с увеличением модуля деформации грунтов в естественном состоянии (E_0) требуется уменьшение диаметра трамбовки (d_{mp}).

При этом уменьшение d_{mp} возможно до определенных пределов, так как при малых значениях d_{mp} ($d_{mp} < 1,0$ м) происходит разуплотнение грунта с образованием зон выпора за пределами пяты трамбования.

Выявлено также, что чем больше мощность уплотняемого слоя (H_{yn}), тем d_{mp} (при прочих постоянных условиях) должен быть меньше.

Это определяет необходимость при уплотнении грунтовых толщ большой мощности одновременно с увеличением d_{mp} увеличивать массу трамбовки (M)

и высоту сброса (H). При этом, чем больше требуемая плотность сухого грунта (ρ_d^{mp}), тем (при прочих постоянных условиях) диаметр трамбовки d_{mp} должен быть меньше.

Следует также отметить, что наибольшая эффективность уплотнения грунтовых оснований достигается при оптимальной (w_{opt}) влажности грунтов. При влажности ниже оптимальной требуется большая энергия на разрушение существующей и формирование новой структуры, что и обуславливает уменьшение глубины уплотнения ($H_{уп}$) при некотором повышении степени уплотнения.

Выявлено также, что с увеличением содержания глинистых частиц значение максимальной плотности сухого грунта (ρ_d^{max}) возрастает, т. е. чем однороднее уплотняемый грунт, тем плотность будет выше при одних и тех же энергозатратах на уплотнение. При этом, чем больше энергия удара (\sqrt{MgH}), тем влажность (w) меньше.

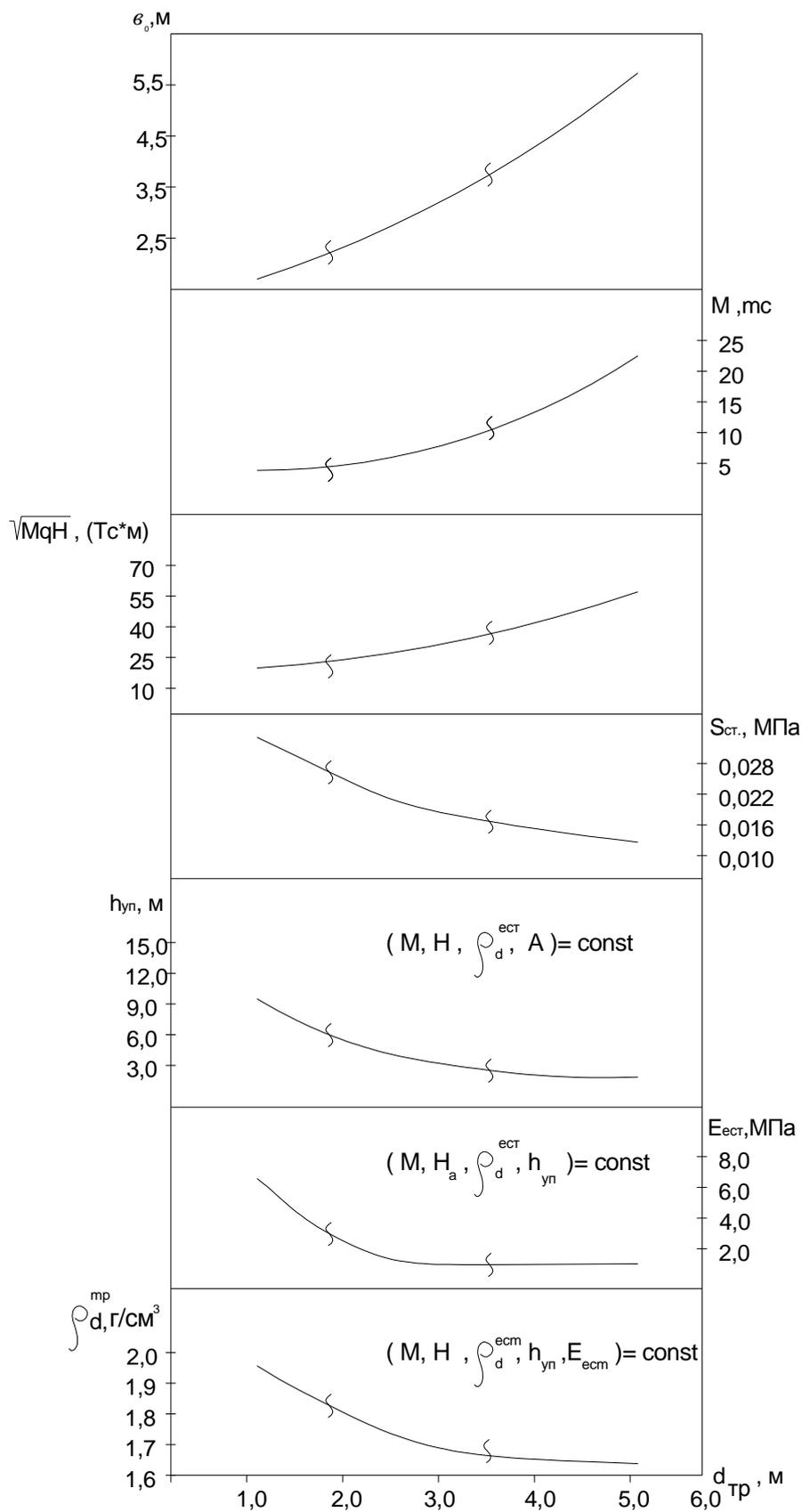
Практически для всех видов и состояний грунтов наибольшее снижение w характерно на первоначальном этапе уплотнения и даже при малой энергии удара. Увеличение энергии удара обуславливает уменьшение w , но оно очень незначительное. Что касается изменений ρ_d , то оно имеет обратную тенденцию, т. е. при увеличении энергии удара ρ_d увеличивается и, особенно, на начальном этапе уплотнения.

Увеличение же массы трамбовки зачастую не обеспечивает не только требуемую степень уплотнения, с минимальными энергетическими затратами, но и равномерность распределения плотности по глубине, т. е. однородность основания.

Так же выявлено, что чем меньше статическое давление на грунт, тем больше ударов в одной точке необходимо выполнять для достижения грунтом требуемой плотности. Малые размеры подошвы трамбовки не только затрудняют производство работ, но, и при достижении определённого предела по диаметру, делают эти работы практически невозможными из-за выпора грунта. Оптимальная площадь основания трамбовки будет лишь в том случае, когда работа ($N_{фак}$), затрачиваемая на уплотнение грунта, будет минимальной (N_{min}).

Не менее существенным фактором качественного уплотнения является и расстояние между точками уплотнения и схема их расположения.

Выявленные взаимосвязи между диаметром (d_{mp}) и массой (M), исходной влажностью (w), глубиной отпечатка (h_{opt}), энергией удара (\sqrt{MgH}), работой (A) и числом ударов (n), расстоянием между точками уплотнения (l), соотношением фактических и требуемых плотностей сухого грунта ($\rho_d^{фак} / \rho_d^{mp}$) и модулем деформации (E_0) позволили составить график взаимозависимости свойств и технологических параметров процесса их уплотнения (рисунок 1) и выделить диапазоны наиболее часто встречаемых в практике конструктивно-технологических параметров механизмов уплотнения и формируемых свойств грунтовых оснований.



M – масса трамбовки; $h_{уп}$ – мощность уплотняемой зоны; ϵ_0 – расстояния между точками трамбования, MgH – энергия одиночного удара; $E_{есм}$ – модуль деформации, $S_{ст}$ – статическое давление на грунт], A – площадь основания трамбовки
Рисунок 1 – График взаимосвязи диаметров трамбовок со свойствами уплотняемых грунтов $d_{тр} = f(P_d^{мп}, E_{есм})$ и технологическими параметрами $d_{тр} = \varphi(h_{уп}, S_{ст}, M, H, \sqrt{MgH}, \epsilon_0)$

Множественность выбора вариантов параметров процесса уплотнения грунтов определяет необходимость разработки методики оптимального выбора конструктивно-технологических параметров позволяющих получить качественное основание при минимальных энергозатратах, а следовательно снизить стоимость работ по нулевому циклу.

Методы исследования. В основу принципа формирования системы выбора возможных вариантов оптимизации процессов уплотнения грунтами тяжелыми трамбовками может быть положена совокупность статических моделей и методов.

Информационная ситуация при ранжировании вариантов оптимизации укладывается в следующую схему. Имеется n возможных вариантов оптимизации, для каждого из которых характерны определенные параметры, при этом систему вариантов оптимизации можно оценить по совокупности факторов, определяющих предпочтительность того или иного варианта.

При достаточно значимом количестве факторов можно достоверно отделить закономерную составляющую, определяющую предпочтительность варианта оптимизации от случайной, обусловленной неполнотой учета всех возможных факторов и ошибками методов формирования ранговых последовательностей [10].

Анализ графика взаимосвязи факторов процесса уплотнения грунтов, т. е. конструктивных параметров трамбовок, технологических параметров процесса и деформационно-прочностных характеристик грунтов, позволил составить морфологическую матрицу численных значений рангов ($R_{ij}, j=1...8$) расчетных условий и расчетных вариантов (таблица 1).

Таблица 1 – Морфологическая матрица численных значений рангов

Расчетные условия	Расчетные варианты													
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄
$B_1[\rho_d^{mp}, \frac{z}{cm^3}]$	2	1	3	1	4	5	6	3	8	4	5	7	9	3
$B_2[E_{ecn}, MPa]$	1	3	2	5	6	1	4	6	2	1	3	2	3	6
$B_3[h_{yn}, m]$	4	3	4	4	2	5	2	7	6	6	7	3	3	2
$B_4[S_{cm}, MPa]$	3	5	3	4	6	3	1	2	5	3	4	2	7	5
$B_5[\sqrt{MgH}, \frac{mc}{m}]$	4	4	3	1	3	4	1	2	4	3	3	2	4	3
$B_6[M, m]$	8	1	9	3	2	1	4	5	2	6	6	2	5	5
$B_7[b, m]$	4	3	4	7	5	3	2	4	3	5	6	1	2	6
$B_8[d_{mp}, m]$	4	6	3	2	4	9	5	2	3	2	7	6	3	2

Для этой системы ранговых последовательностей может быть принята одна из мер «детализации» учета соответствующих факторов вида [11, 12]

$$\Delta j = \max_i R_{ij} - \min_i R_{ij}, 1 \leq \Delta j \leq m. \quad (1)$$

Степень детализации учета любого из факторов можно характеризовать суммой рангов

$$S_j = \sum_{i=1}^m R_{ij}. \quad (2)$$

Количественную оценку степени предпочтения факторов можно определять оценкой Фишборна

$$\bar{P}_j = \frac{2 \cdot (n - j + 1)}{n \cdot (n + 1)}, j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Однако так как информационная ситуация характеризуется неопределенностью, т. е. объективно существуют весовые коэффициенты, отражающие значимость каждого из факторов, но для конкретных случаев они не известны, то для решения проблемы можно использовать принцип максимума неопределенности, введя в рассмотрение меру неопределенности второго рода [13, 14]

$$H_2(P) = \prod_{j=1}^n P_j^{n-j+1}. \quad (4)$$

Решая задачу на условный экстремум

$$H_2(P) = \prod_{j=1}^n P_j^{n-j+1} \rightarrow \max_{P_j} \sum_{i=1}^m P_j = 1, \quad (5)$$

при условии

$$P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_j \geq \dots \geq P_n \geq 0, \quad (6)$$

с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа имеем:

$$\left. \begin{aligned} L(\bar{P}) &= H_2(\bar{P}) + \lambda \cdot (1 - \sum_{i=1}^m P_j); \\ \frac{\partial L}{\partial P_j} &= P_1^n \cdot P_2^{n-1} \dots (n - j + 1) \cdot P_j^{n-j} \dots P_n^1 - \lambda = 0; \\ j &= 1, \dots, n, \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

отсюда

$$\left. \begin{aligned} \lambda \bar{P}_j &= H(\bar{P}) \cdot (n - j - 1); \\ \lambda &= \sum_{i=1}^m H(\bar{P}) \cdot (n - j - 1) = H(\bar{P}) \cdot \left(\frac{(n + 1) \cdot n}{2} \right); \\ \bar{P}_j &= \frac{2 \cdot (n - j + 1)}{(n + 1) \cdot n}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Однако учитывая, что оценки Фишборна предполагают строгое упорядочение ранговых последовательностей

$$B_1 > B_2 > \dots > B_j > \dots > B_n, \quad (9)$$

а для практики это обстоятельство зачастую мало характерно, были рассмотрены модифицированные оценки, обеспечивающие максимум меры неопределенности, при ограничениях, допускающих равенство мер для Δ_j некоторых ранговых последовательностей [14, 15], т. к.

$$\dots\Delta_{j-1} \leq \Delta_j = \Delta_{j+1} = \dots = \Delta_{j+k} \leq \Delta_{j+k+1}\dots, \quad (10)$$

где k_j – степень кратности ранговых последовательностей при их упорядочении по мере Δ_j .

Отсюда совокупности мер Δ_j соответствует упорядоченная по степени предпочтения система ранговых последовательностей

$$\dots(\dots, B_{j-1}) > B_j(B_{j+1}, \dots, B_{j+k}) > B_{j+k+1}(B_{j+k+2})\dots \quad (11)$$

с количественной оценкой предпочтения вида –

$$\bar{P}_j = \frac{n-j+1}{S}, \quad (12)$$

где

$$S = \sum_{j=1}^l k_j \cdot (n-j+1); \quad l = n - \sum_{j=1}^n (k_j - 1). \quad (13)$$

Соответственно имеем: $\Delta_1 = 8; \Delta_2 = 5; \Delta_3 = 6; \Delta_4 = 4; \Delta_5 = 3; \Delta_6 = 8; \Delta_6 = 6; \Delta_7 = 8$, что определяет следующее упорядочение ранговых последовательностей

$$B_1(B_6, B_8) > B_3(B_7) > B_2 > B_4 > B_5. \quad (14)$$

При $S = 69$ весовые коэффициенты ранговых последовательностей соответственно будут равны:

$$P_1 = P_6 = P_8 = 0.131; \quad P_3 = P_7 = 0.116; \quad P_2 = 0.101; \quad P_4 = 0.087; \quad P_5 = 0.073.$$

Однако упорядочение ранговых последовательностей расчетных вариантов, без учета абсолютных значений, может сопровождаться потерей информации.

Во избежание этого используем принцип «потенциального распределения», т. е. условный экстремум [12, 16]:

$$\left. \begin{aligned} H &= -\sum_{j=1}^n P_j \cdot \ln P_j \rightarrow \max_{P_j}; \\ \sum_{j=1}^n P_j &= 1; \\ \prod_{j=1}^n \Delta_j^{P_j} &= const, \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где первое уравнение выступает в качестве оптимизируемого функционала, определяющего меру неопределенности, второе – условие нормировки, третье – постулирования постоянства среднегеометрического значения меры Δ_j .

Соответственно, используя критерий Байеса

$$w_i = \sum_{j=1}^n \bar{P}_j \cdot P_{ij}, \quad (16)$$

получаем коэффициенты (q_j) для расчетных вариантов (A_i) (таблица 2).

Таблица 2 – Значения критериев Байеса и весовых коэффициентов расчетных вариантов

Расчетные условия	Расчетные варианты													
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄
Критерий Байеса, w_i	3,415	4,112	4,124	5,843	5,263	6,209	4,828	4,219	4,002	3,642	5,013	5,612	6,210	3,946
Весовые коэффициенты, q_j	0,088	0,064	0,062	0,583	0,585	0,041	0,058	0,0603	0,069	0,083	0,594	0,589	0,040	0,082

Следовательно – $A_1 > A_{10} > A_{14} > A_9 > A_2 > A_3 > A_8 > A_{11} > A_5 > A_{12} > A_4 > A_6 > A_{13}$.

Достоверность оптимальности выбора варианта процесса уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками определим оценкой математического ожидания (m_w) методами интенсивного ударного уплотнения и среднеквадратического отклонения (σ_w) критерия Байеса [17]

$$m_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i; \quad \sigma_w^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_i - m_w)^2. \quad (17)$$

Имеем: $m_w = 4,462$, $\sigma_w = 0,957$.

Согласно таблицам интегральной показательной функции [17] студентизированная величина равна $x = 0,192$, которой соответствует вероятность $P = 0,92$.

Бесспорно, как показывают исследования процесса уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками, что значимое влияние имеют и другие факторы – начальное напряженно-деформированное состояния грунтового массива, форма поверхности подошвы трамбовок, схема размещения точек уплотнения, технологическая этажность процесса уплотнения и др., однако предложенный подход к поиску вариантов оптимизации процесса уплотнения дает возможность практического учета влияния всех факторов.

Заключение. Произвольный выбор конструктивных параметров тяжелых трамбовок и неучет технологических особенностей и закономерностей динамики уплотнения грунтов методами интенсивного ударного уплотнения практически всегда приводят к удорожанию инженерной подготовки строительной площадки и не позволяют достичь требуемого уплотнения грунтовых оснований при относительно приемлемых энергетических затратах.

Оптимизация размеров и форм подошвы трамбовок, а соответственно массы, высоты сбрасывания, расстояния между точками уплотнения, технология и организация производства работ требует полного и достоверного учета как инженерно-геологических условий, так и большинства конструктивно – технологических параметров и факторов.

Оптимизация при множестве факторов и параметров требует использования совокупности статических моделей и методов, базирующихся на следующих процедурных этапах:

- формирование множества расчетных случаев и множество факторов, в которых эти расчетные случаи могут реализоваться;

- определение и задание ранговых критериев предпочтительности с позиции учета одного из главных факторов;
- формирование ранговых последовательностей и мер при упорядочении расчетных случаев;
- построение (принятие) моделей расчета весовых коэффициентов ранговых последовательностей и выбор основной модели;
- определение весовых коэффициентов расчетных случаев и выбор проектного варианта.

Бесспорно, предложенная схема поиска оптимальных вариантов требует широкого использования САПР.

Список цитированных источников

1. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Швец, В. Б. Уплотнение грунтов оснований тяжелыми трамбовками / В. Б. Швец. – Москва : Росстройиздат, 1958 – 162 с.
3. Вуцель, В. И. Интенсивное динамическое уплотнение грунтов / В. И. Вуцель, Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов // Энергетическое строительство за рубежом, 1983. – № 3. – С. 39–43.
4. Пойта, П. С. Основные принципы прогнозов уплотнения грунта при интенсивном импульсном нагружении / П. С. Пойта, А. Н. Тарасевич // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. – № 5(17). – С. 23–25.
5. Пойта, П. С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1. – С. 109–110.
6. Пойта, П. С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П. С. Пойта // Строительство. – Минск. – 2003. – № 1–2. – С. 243–247.
7. Пойта, П. С. Влияние конструктивных параметров и особенностей формы подошвы тяжелых трамбовок на формирование свойств грунтов в зоне уплотнения / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура – 2013. – № 1. – С. 72–77.
8. Клебанюк, Д. Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура – 2013. – № 1. – С. 77–81.
9. Клебанюк, Д. Н. Пути совершенствования конструктивно-технологических параметров процесса уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-технич. конференции. – Минск, 2013. – Ч. II. – С. 109–120.
10. Клебанюк, Д. Н. Некоторые технологические аспекты устройства искусственных оснований методами интенсивного ударного уплотнения / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Современные геотехнологии в строительстве и их научно – техническое сопровождение : сборник трудов международной НТК. – Санкт – Петербург, 2014. – Ч. II. – С. 191–198.
11. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е. М. Четыркин. – Москва : Статистика, 1977 – 406 с.
12. Гумбель, Э. Статистика экспериментальных значений / Э. Гумбель. – Москва : Мир, 1965 – 392 с.
13. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности / Г. Райфа. – Москва : Наука, 1970 – 296 с.
14. Раманчандран, М. Теория характеристических функций / М. Раманчандран. – Москва: Наука, 1973 – 306 с.
15. Хаттманспергер, Т. Статистические выводы, основанные на рангах / Т. Хаттманспергер. – Москва : Финансы и статистика, 1987 – 282 с.
16. Уилкс, С. Математическая статистика / С. Уилкс. – Москва : Наука, 1967 – 624 с.
17. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер – Москва : Мир, 1967. – Т. 2. – 423 с.