

К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ, УПЛОТНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ, НА УРОВЕНЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-ФУНДАМЕНТ-ЗДАНИЕ»

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

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты поиска решения проблемы влияния неопределенности и неоднородности формирования структуры и строительных свойств грунтовых оснований, уплотненных тяжелыми трамбовками, с позиции учета конструктивно-технологических факторов и геотехнических условий строительных площадок.

Выявлено, что наиболее перспективным в решении проблемы является использование теории нечетких множеств, мер и интегралов, базирующихся на моделях нечетких процессов.

Ключевые слова: оптимизация, грунтовые основания, уплотнение, неопределенность, нечеткие множества, меры и интегралы, модели нечетких процессов.

Илл. 2, табл. 3, библи. назв. 11.

Annatation. The article discusses the main aspects of finding a solution to the problem of the influence of uncertainty and heterogeneity in the formation of the structure and construction properties of soil foundations compacted by heavy rammers from the perspective of taking into account design and technological factors and geotechnical conditions of construction sites.

It has been revealed that the most promising solution to the problem is the use of the theory of fuzzy sets, measures, and integrals based on models of fuzzy processes.

Keywords: optimization, soil bases, compaction, uncertainty, fuzzy sets, measures and integrals, models of fuzzy processes.

Fig. 2, tab. 3, bibl. name. 11.

Введение. Имеющиеся исследования и производственный опыт [1-5] показывают, что при поверхностном уплотнении грунтовых оснований наиболее эффективным является применение тяжелых трамбовок, обуславливающих большую остаточную осадку грунта в отпечатке при одних и тех же энергетических затратах.

Выявлено также, что только полный и достоверный учет и знание основных закономерностей и особенностей формирования структуры и строительных свойств грунтового массива позволяют оптимизировать выбор варианта производства работ, обеспечивающий наибольший эффект и эксплуатационную надежность системы «основание-фундамент-здание».

Сегодня единственной основой для определения инженерно-геологического строения и деформационно-прочностных свойств грунтов основания являются данные изысканий, дающие относительно достоверные значения только в точках, где производился отбор грунтовых проб или в точках зондирования, где определялись

расчетные характеристики грунтов. В остальных точках грунтового полупространства свойства и строение обычно устанавливаются интуитивно или методами математической интерпретации.

Отсюда, учитывая, что для любого грунтового основания характерны не только стохастическая природа и пространственная неоднородность, но и неопределенность формирования свойств как в пространстве (по площади и глубине), так и во времени, для адекватного отражения и учета этих особенностей, при проектировании фундаментных конструкций и соответственно компенсации неполноты, сложности и искаженности инженерно-геологической информации, необходима разработка методики оценки их влияния на уровень эксплуатационной надежности системы «основание-фундамент-здание».

Анализ традиционных методов. На практике уровень эксплуатационной надежности системы «основание-фундамент-здание» обычно определяют через взаимосвязь меры надежности (H) и вероятности ненаступления ни одного из возможных предельных состояний в заданных условиях в течение срока эксплуатации (P_n), т.е. $H=P_n$ [6] и сводится он к анализу двух неравенств:

$$V \geq V_2; \quad V = V_1 - V_2 \geq 0, \quad (1)$$

где V_1 и V_2 – соответственно факторы системы – внутренний, определяющий несущую способность (предельно допустимые деформации) и внешний – характеризующий действующие нагрузки при их наиболее невыгодном сочетании; V – совокупный фактор являющийся функцией случайных аргументов численных характеристик V_1 и V_2 . Это позволяет осуществлять определение уровня надёжности (H) через плотность $f_y(y)$ и функцию распределения $F_y(y)$ случайной величины V при $V = y = 0$.

При известности интегральной функции распределения $F_y(y)$ совокупного случайного фактора V , с учётом соответствующих преобразований, уровень надежности системы можно описать уравнением:

$$H = 1 - \int_{y=0}^{\infty} f_y(y) \cdot dy \quad (2)$$

и соответственно используя для распределения функций $f_y(y)$ и $F_y(y)$ ряды Шарлье –

$$H = \frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \Phi_Z \cdot \left(\frac{m_y}{\sigma_y} \right) \right] + \frac{1}{6!} \cdot \frac{\mu_{3y}}{\sigma_y^3} \cdot \varphi^{(2)} \cdot \left(\frac{m_y}{\sigma_y} \right) + \frac{1}{24} \left(\frac{\mu_{4y}}{\sigma_y^4} - 3 \right) \cdot \varphi_0^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{y_y} \right) \right\}, \quad (3)$$

$$\left[m_y = m_{y1} - m_{y2}; \quad \mu_{3y} = \mu_{y1} - \mu_{y2}; \quad \mu_{4y} = \mu_{4y1} + \mu_{4y2} + 6D_{4y1} \cdot D_{4y2} \right]$$

Где $m_{y1}, m_{y2}, \sigma_{y1}, \sigma_{y2}, D_{y1}, D_{y2}, \mu_{3y1}, \mu_{3y2}, \mu_{4y1}, \mu_{4y2}$ – соответственно математические ожидания, среднеквадратические отклонения дисперсии и центральные моменты третьего и четвертого порядка факторов V_1 и V_2 как случайных величин; Φ_Z – функция Лапласа (интеграл вероятностей); $\varphi_0^{(2)}, \varphi_0^{(3)}$ – вторая и третья производные для нормированной случайной величины $Z = \frac{y - m_y}{\sigma_y}$, соответствующей случайной величине V .

Применяемый в практике коэффициент надежности (запаса) k_n , при расчетах по любому предельному состоянию, определяют из соотношения [6]

$$k_n = \frac{m_{y1}}{m_{y2}} = \frac{m_y}{m_{y2}} - 1, \quad (4)$$

что позволяет для расчетного уровня надежности системы «основание-фундамент-здание» использовать следующую зависимость –

$$H = \frac{1}{2} [1 + \Phi(K)] + \frac{1}{6} \cdot \frac{M_{3y}}{\sigma_y^3} \cdot \varphi_0^2 \cdot K, \quad (5)$$

где

$$K = \left(\frac{k_n - 1}{\sqrt{V_{y1}^2 \cdot k_n^2 + V_{y2}^2}} \right); \quad k_n = \frac{1 - \sqrt{1 - (Z \cdot V_{y2}^2 - 1) \cdot (Z^2 \cdot V_{y1}^2 - 1)}}{1 - Z^2 \cdot V_{y1}^2}; \quad (6)$$

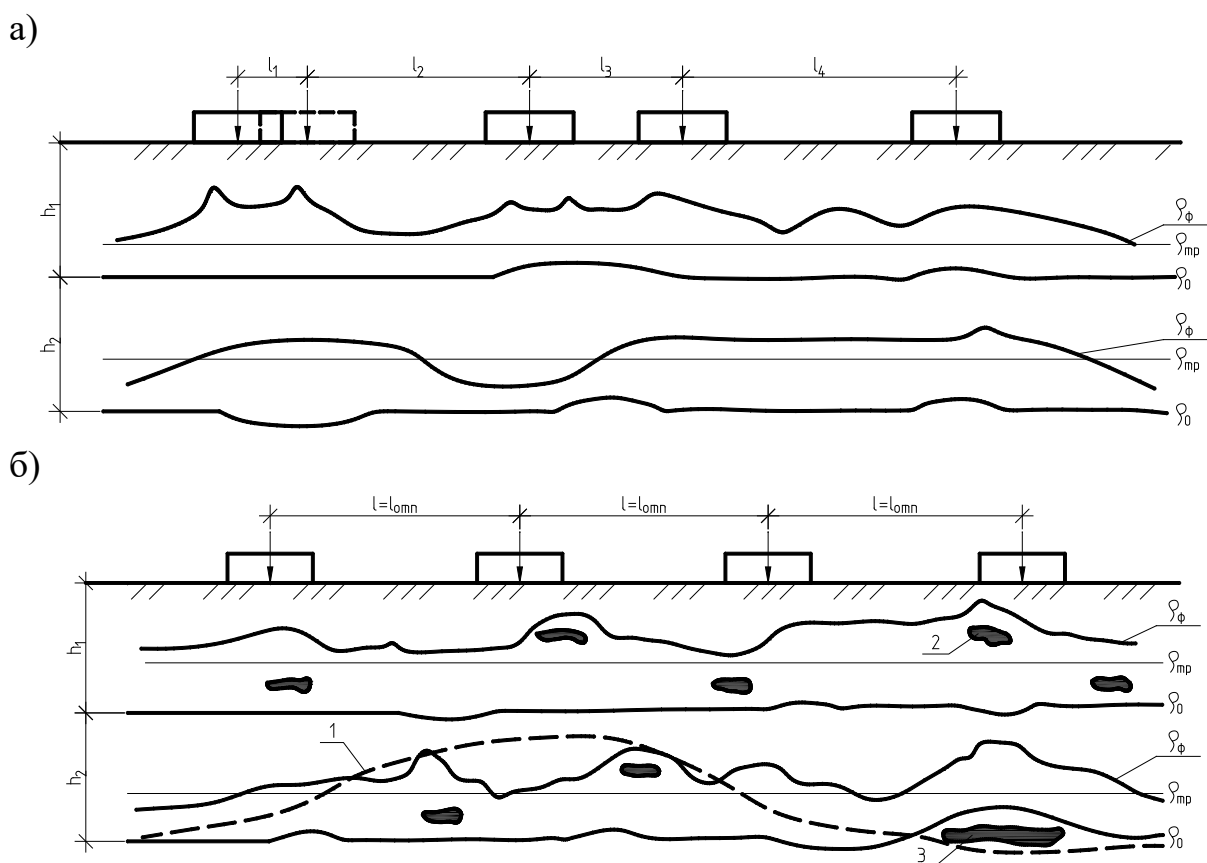
V_{y1} и V_{y2} – коэффициенты вариации величин Y_1 и Y_2 и $V_{y1} = \frac{\sigma_{y1}}{m_{y1}}$; $V_{y2} = \frac{\sigma_{y2}}{m_{y2}}$.

Следует также отметить, что при проектировании фундаментных конструкций наиболее существенен вопрос обеспечения требуемой эксплуатационной надежности при варьировании фактора V_1 , определяющего совокупность деформационно-прочностных характеристик грунтов и напряженного состояния грунтового массива.

Проведенные экспериментальные исследования по влиянию неоднородности грунтовых условий на уровень надежности системы «основание-фундамент-здание» показали, что повышение Z , а следовательно, и уровня эксплуатационной надежности (H), наиболее эффективно за счёт снижения коэффициента вариации V_{y1} «внутреннего» фактора, т. е. обеспечения однородности грунтового основания. При этом необходимо отметить, что даже незначительное повышение уровня эксплуатационной надёжности системы требует существенного увеличения коэффициента надёжности (запаса) и соответственно значительного ухудшения технико-экономических показателей принимаемых конструктивно-технологических решений.

В действующих нормативных документах по проектированию фундаментных конструкций не содержится конкретных рекомендаций по оценке как локальной и пространственной неоднородности инженерно-геологических условий строительных площадок и неопределенности деформационно-прочностных характеристик грунтов, так и динамики их изменений в процессе строительства и эксплуатации объекта.

На рис. 1 представлены типичные схемы формирования плотности сложения грунтов по глубине и площади в массиве, уплотненном тяжелыми трамбовками, в зависимости от влияния технологических и геотехнических факторов. В качестве технологических рассмотрены только расстояние между точками трамбования (l_i), а в качестве геотехнических – инженерно-геологическое строение и локально-пространственная неоднородность сложения [7].



ρ_{ϕ} , $\rho_{тр}$ и ρ_o – соответственно фактическая, требуемая и естественная плотность грунтов; 1 – линия раздела слабо-, средне- и сильно сжимаемых грунтов; 2 – локальная неоднородность; 3 – макронеоднородность, связанная с напластованием грунтов различных типов
 Рисунок 1 – Графики изменения $\rho_d=f(h)$ уплотненного основания в зависимости от влияния технологических (а) и геотехнических (б) факторов

Анализ относительных эпюр плотностей грунтов по глубине в зоне уплотнения показывает, что как технологические (l_i), так и геотехнические факторы (степень естественной неоднородности) определяют неоднородность степени уплотнения в значительном диапазоне $\rho_{\phi} \geq \rho_{тр}$ до 30%.

Но даже если оптимизировать технологические факторы ($l=l_{опт}$), то геотехнические факторы обуславливают неоднородность степени уплотнения до $\pm 20\%$ и более. При этом степень неоднородности уплотнения по глубине (при h_2) значительно увеличивается, и фактическая плотность может быть меньше проектной $\rho_{\phi} < \rho_{тр}$. А это усложняет проектировщику задачу выбора глубины заложения и типа фундамента с позиции однородности характеристик грунтов оснований, обеспечивающих равномерность осадки фундаментов.

Однако все эти особенности определяются только неоднородностью, т. е. исходят из условия достоверности знаний геотехнических условий и параметров, что для практики не характерно и малореально.

Возможность учета факторов неопределенности. Множественность факторов неопределенности в формировании структуры и свойств грунтовых оснований определяет необходимость анализа применимости известных математических теорий с точки зрения возможностей учета неопределенности основных факторов и характеристик (табл. 1) [2, 6, 7].

Таблица 1 – Возможности математических теорий учета факторов неопределенности

Учитываемая характеристика неопределенности	Возможности теорий по учету факторов неопределенности						
	Вероятности	Ошибок (интервальных моделей)	Интервальных с редких	Субъективных вероятностей	Многозначной логики	Нечетких множеств	Нечетких мер и интегралов
Фактическая числовая неопределенность	+	+	+	+		+	+
Фактическая нечисловая неопределенность	+		+	+	+	+	+
Противоречия между точностью и неопределенностью			+	+	+	+	+
Возможность количественной оценки неопределенности	+			+		+	+
Эффективность формализации полного незнания		+	+	+	+	+	+
Требования жесткого определения всех событий, факторов и характеристик		+	+		+	+	+
Возможность эффективного учета взаимовлияния неопределенности					+		+
Возможность получения оптимистических и пессимистических оценок и уровня доверия к ним	+		+	+		+	+
Единство подхода к представлению точных, неполных, неопределенных и нечетких знаний							+
Возможность работы с неопределенной информацией на базе малых статистических выборок		+	+		+	+	+

Примечание: (+) – возможен; (–) – невозможен учет факторов неопределенности.

Как видно из таблицы, наиболее полный учет большинства факторов и характеристик неопределенности позволяет использование теории нечетких множеств, мер и интегралов, базирующейся на моделях нечетких процессов.

Следует отметить, что нечеткая мера является обобщенным понятием вероятностной меры, свободной от ряда ограничений, а с математической точки зрения – однопараметрическим расширением вероятностной меры, удовлетворяющей условиям ограниченности и непрерывности.

Что касается нечеткого процесса, то под ним следует понимать процесс, состояние которого в каждый момент времени $t=T$ может быть описано некоторым распределением нечеткости на пространстве его состояний [8, 9].

Все это позволяет состояние системы «основание-фундамент-здание» определять совокупностью динамических процессов, которые формируются действием совокупности внутренних и внешних факторов, при этом возможное состояние ограничивается некоторым нечетким процессом, описываемым нечетко-интегральным уравнением вида [10, 11].

$$\mu_{i+1}(\omega) = \int_{\Omega_i} h(\omega, \omega') \cdot \int_{\Omega} \mu_i(\omega) \cdot q(\bullet), \quad (7)$$

где $\mu_i(\omega)$ – функция, описывающая состояние нечеткого процесса в i -й момент времени; $q(\bullet)$ – нечеткая мера на пространстве состояний; $h(\omega, \omega')$ – нечеткое отношение на расчетном временном интервале и $h(\omega, \omega') = \mu_{i+1}(\omega') \cdot X_{H_{\mu_{i+1}}}(\omega)$; $X_{H_{\mu_{i+1}}}(\omega)$ – характеристическая функция множества для фиксированного $\omega' \in \Omega$.

Задаваясь важностью влияния различных факторов $p(x)$, прогнозирование состояния системы сводится к нахождению такого нечеткого процесса, который бы агрегировал исходный процесс с учетом функции $p(x)$, т. е.

$$S_{i_{np}}(\omega) = F\left(\sigma_{x_k}(\omega, t_{np}), p(x)\right), \quad (8)$$

где F – оператор оперирования функции.

Таким операторам может выступать нечеткий интеграл на множестве x по некоторой нечеткой мере $\bar{\omega}_x(\bullet)$. А так как агрегирующие свойства нечеткого интеграла определяются распределением меры $\bar{\omega}_x(\bullet)$, то в зависимости от нее он может определяться как операцией со свойствами объединения, так и операцией со свойствами нечетких множеств со следующими мерами [9, 10]:

- для объединения множеств

$$q_F = \int_x \eta(x) \cdot \bar{\omega}(\bullet), \quad (9)$$

где $\eta(x_j) = \frac{n-j}{n-1}, x_j \in X$;

- для пересечения множеств

$$t_F = 1 - q_F. \quad (10)$$

Отсюда, основу решения любых проблем методами теории нечетких интегралов, множеств и мер составляет формализация нечетких данных и выбор модели приемлемости риска. Один из наиболее оптимальных вариантов формализации нечетких данных для оценки уровня риска $d \in D$ формирования критического состояния (эксплуатационной надежности) системы «основание-фундамент-здание» представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Формализация нечетких данных для оценки эксплуатационной надежности системы «основание–фундамент–здание»

Описание данных	Формализованное представление данных
Полная уверенность, что риска нет	$\mu(d) = \begin{cases} 0, d \in D \setminus \{6\} \\ 1, d = 6 \end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, но тяжело оценить его значение	$\mu(d) = \begin{cases} 1, & \mu(\cdot) = M_{\text{вз}}(\cdot), d \neq 6 \\ \lambda \in [0,1] \mu(\cdot) = M_n(\cdot), M_D(\cdot), d \neq 6 \\ 0, & \mu(\cdot) = M_H(\cdot), d = 6 \end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, однако известно, что его значение от минимального до допустимого	$\mu(d) = \begin{cases} 1, d \in [2,3] \\ 0, d \notin [2,3] \\ 0, d = 6 \end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, но значение его четко неизвестно	$\mu(d) = \begin{cases} \phi(d), d \in D \setminus \{6\} \\ 0, d = 6 \end{cases}$, $\phi(d)$ – распределение нечеткости для риска низкого уровня
Полная уверенность, что риск допустимый	$\mu(d) = \begin{cases} 0, d \in D \setminus \{3\} \\ 1, d = 3 \end{cases}$
Вполне правдоподобно, что есть риск достаточно высокого уровня, но имеется и не нулевая возможность λ , что риска нет	$\mu(d) = \begin{cases} M_n, d \in D \setminus \{6\} \\ \lambda, d = 6 \end{cases}$, M_n – распределение меры правдоподобия для риска высокого уровня
Неизвестно есть риск или нет, но если есть, то его величина вообще неизвестна	$\mu(d) = \begin{cases} 1, & \mu(\cdot) = M_{\text{вп}}(\cdot) \\ \lambda \in [0,1] \mu(\cdot) = M_n(\cdot), M_D(\cdot) \\ 0, & \mu(\cdot) = M_H(\cdot) \end{cases}$
Вполне возможно, что риска нет, но имеется и не нулевая возможность, что он есть и не выше критического	$\mu(d) = \begin{cases} \lambda, d < 3 \\ 0, d \geq 3 \\ 1, d = 6 \end{cases}$

Примечание: 1 – событие возможно; 2 – событие невозможно; M_n – мера правдоподобия; M – мера возможности; M_H – мера необходимости; M_D – мера доверия; $M_{\text{вп}}$ – мера вероятности. Оценка риска: $D = (1$ – отсутствует; 2 – минимальный; 3 – допустимый; 4 – критический; 5 – недопустимый; 6 – неизвестно, является ли это риском); μ – функция принадлежности; λ – параметр нормировки.

При формализации использованы q -нечеткие меры, следующим образом зависящие от параметров нормировки:

$$\left. \begin{aligned} M_n \in 1 < \lambda < 0; & M_{\text{вз}} \in \lambda = -1; & M_n \in \lambda > 0; \\ M_q \in \lambda > 0; & M_{\text{вп}} \in \lambda = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Отметим, что любые «четкие» данные в практике представимы примитивным классом мер Дирака и

$$\mu(d) = \left. \begin{aligned} & 1, x_o \in A \\ & 0, x_o \notin A > -\infty < \lambda < +\infty \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где x_o – заданный элемент (носитель меры) в пространстве x .

Бесспорно, предложенная формализация нечетких данных не ограничивает всего спектра возможностей формализации. При необходимости можно использовать и другие варианты формализации, позволяющие более широко описать весь спектр разнородных и малодостоверных данных.

Что касается выбора модели динамики риска соответствующей категории ситуации уровня уязвимости системы «основание-фундамент-здание», то целесообразно базироваться на типовых моделях, учитывая особенности условий ее функционирования – устойчивое, неустойчивое, стабильное, квазистабильное, переходное и квазипереходное и динамику величин факторов в период функционирования системы – внутрисистемных (R_k), прямого (R_p) и косвенного (R_n) воздействия и фоновых (R_c)(табл. 3).

Таблица 3 – Типовые модели приемлемости риска

Модели динамики рисков	Особенности условий функционирования системы	Уровень уязвимости системы
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_n > R_n^\Gamma$	Факторы прямого воздействия переходят критическую границу и изменяют условия функционирования	низкий
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_p > R_p^\Gamma$	Факторы косвенного воздействия переходят критическую границу, частично переходя в прямые, и изменяют условия функционирования	минимальный
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_c > R_c^\Gamma$	Факторы фонового воздействия переходят критическую границу частично переходя в более низкие категории и изменяют условия функционирования	повышенный
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_n > R_n^\Gamma$ $R_p > R_p^\Gamma$	Факторы прямого и косвенного воздействия переходят критическую границу, становятся трудноразличимыми и изменяют условия функционирования	средний
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_p > R_p^\Gamma$ $R_c > R_c^\Gamma$	Факторы косвенного и фонового воздействия переходят критическую границу, становятся трудноразличимыми и изменяют условия функционирования	сильный
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_n > R_n^\Gamma$ $R_p > R_p^\Gamma$ $R_c > R_c^\Gamma$	Факторы прямого, косвенного и фонового воздействия переходят критическую границу, становятся трудноразличимыми и изменяют условия функционирования	недопустимый
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_k > R_n$	Факторы прямого воздействия становятся более значимы чем внутрисистемные	минимальный
$R_k > R_n > R_p > R_c$ $R_k > R_c$	Факторы прямого и косвенного воздействия становятся более значимы, чем внутрисистемные	средний
$R_k > R_n > R_p > R_c$	Факторы прямого, косвенного и фонового воздействия становятся более значимы, чем внутрисистемные	повышенный

Примечание: R_i^Γ – граничное значение рисков i -го воздействия

Заключение. На сегодня теория нечетких множеств, мер и интегралов в решении проблем прогнозирования процессов, рисков и соответственно эксплуатационного состояния сложных систем практически не используется. Имеющиеся комплексы программных продуктов *Fuzzy*-технология позволяют лишь дать анализ данных, рисков и оценку событий при наличии информации, не вызывающей должного доверия и недостаточной известности факторов будущего.

Отсюда поиск решения задач прогнозирования эксплуатационной надежности системы «основание–фундамент–здание» в условиях неопределенности на базе нечетких процессов в настоящее время весьма и весьма актуален, но бесспорно решение проблемы требует широкого использования компьютерных систем.

Список использованных источников

1. Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта // Вестник БрГТУ. – 2003. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 109-110.
2. Пойта, П.С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П. С. Пойта // Строительство. – Минск. – 2003. – № 1-2. – С. 243-247.
3. 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 БрГТУ. – 2003. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 72-77.
4. Клебанюк, Д.Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтовых оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Вестник БрГТУ. – 2003. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 77-81.
5. 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.
6. Бондарик, Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород / Г. К. Бондарик. – М.: Недра, 1971. – 148 с.
7. Шведовский, П.В. Влияние и учет неоднородности уплотнения грунтовых массивов тяжелыми трамбовками на уровень надежности системы «основание-сооружение» / П. В. Шведовский, П. С. Пойта, Д. Н. Клебанюк // Вестник БрГТУ. – 2003. – № 1:6 Строительство и архитектура. – С. 68-72.
8. Зайченко, Ю.П. Исследование операций: нечеткая оптимизация / Ю. П. Зайченко. – Киев: Выща школа, 1991. – 191 с.
9. Бочарников, В.П. Модель управляемого непрерывного нечеткого процесса на основе нечетко-интегрального уравнения / В. П. Бочарников // Проблемы управления и информатики. – К.: КМУГА, 1998. – С. 72-77.
10. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Терно; пер. с япон. – М.: Мир, 1993. – 386 с.
11. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности / Г. Райфа. – М.: Наука, 1970. – 402 с.