

и экологические проблемы сельского и водного хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2010. – Ч. 2. – С. 176–184.

Материал поступил в редакцию 05.05.11.

Каганов Григорий Михайлович, доктор технических наук, профессор

Тел. 8-499-153-86-48

E-mail: volkag@yandex.ru

Черных Ольга Николаевна, кандидат технических наук, профессор

Тел. 8-499-976-24-60

E-mail: chatra@mail.ru

Волков Владимир Иванович, кандидат технических наук, профессор

Тел. 8-499-153-86-48

E-mail: volcov_vi45@mail.ru

Алтунин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент

Тел: 8-499-155-03-16

E-mail: chatra@mail.ru

УДК 502/504:627.82.034.93

В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, А. М. СИЛКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

Н. Ф. ЖАРНИЦКАЯ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет»

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПЕРАТИВНЫХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРУНТОВ

Обосновывается, что в геотехническом контроле особенно значимым и рациональным при определении строительных показателей грунтов является принцип косвенной их оценки по основным физическим характеристикам с помощью несложных математических зависимостей, позволяющих быстро оценить влияние изменения показателей грунтов, входящих в эти формулы, на результат.

Геотехнический контроль, статистическая модель, косвенные (оперативные) определения показателей грунтов, квалификационные показатели грунтов, факторы признака, факторы результата, закон больших чисел, дисперсия, степень свободы, квантиль, коэффициент детерминации.

Мировой опыт гидротехнического строительства показывает, что служба геотехнического контроля является главным подразделением, которое отвечает за качество возведения грунтовых элементов

плотины. При этом особое значение приобретает вооруженность персонала этой службы современными, оперативными и надежными методами и техническими приемами контроля качества их возведения.

Все это более чем актуально, особенно если строительство напорных грунтовых сооружений ведется в сейсмически активных районах с высокой интенсивностью и строгой последовательностью работ, укладкой одновременно нескольких видов грунтов, изменчивостью свойств грунтов в карьерах и т.д. В таких условиях формальное выполнение проектных требований геотехнического контроля в зависимости от объема уложенного грунта прямыми (экспериментальными) методами приводит к снижению темпов работ по отсыпке из-за неоперативности в оценке качества уплотнения, к большому количеству переделок и, как следствие, к удорожанию строительства. Даже абсолютно точное соблюдение положений нормативных документов, регламентирующих работу геотехнического контроля, не позволяет избежать указанных ситуаций при строительстве грунтовых плотин [2, 3]. Вот почему очень важно иметь такую систему геотехнического контроля качества укладки грунтов, которая не была бы трудоемкой, сложной по математическому аппарату, отличалась бы оперативностью, четкостью и доступностью для персонала.

В геотехническом контроле, как и в инженерно-геологических прогнозах, особенно значимым и рациональным при определении строительных параметров грунтов является принцип косвенной их оценки по основным физическим характеристикам с помощью несложных математических зависимостей, позволяющих при необходимости быстро оценивать влияние изменения показателей грунтов, входящих в эти формулы, на результат.

Грунты относятся к системам, где велико взаимное влияние факторов [3, 4]. Поэтому задача исследования возможности разработки тех или иных распределений для описания такого важнейшего свойства грунтов, как их изменчивость, может иметь два пути:

теоретическое обоснование типа распределения с позиции физической сущности модели грунта, в описании которой используется рассматриваемый показатель;

перебор статистических моделей и оценка каждой из них с точки зрения соответствия опытным данным по рассматриваемому показателю.

Предпочтителен первый подход. Однако в связи с трудностями его реализации к настоящему времени удовлетворительное теоретическое обоснование распределения показателей свойств грунтов отсутствует. Поэтому разработка косвенных (оперативных) методов определения контролируемых показателей свойств грунтов выполняется в рамках второго подхода, где статистический аспект надежности выдвигается на передний план.

Важнейшим условием выполнения этапа является правильная оценка свойств грунтов, которые используются в качестве индикационных при определении устанавливаемых параметров, необходимых для геотехнического контроля. С одной стороны, устанавливаемые строительные показатели характеризуют грунт при строго фиксируемых условиях, например при данном составе, плотности, влажности и др. С другой стороны, они зависят от фациальных и генетических особенностей грунта. Следовательно, индикационные показатели свойств грунта должны в значительной степени достоверно характеризовать конкретные строительные параметры. Такие связи могут быть функциональными, поскольку устанавливаемые показатели зависят от множества факторов, некоторые из которых пока не поддаются количественному учету (например, прочность структурных связей или содержание минералов той или иной группы и т.д.). Тем не менее, можно установить ряд квалификационных показателей (модулей) грунтов, представляющих собой совокупность индикационных показателей, имеющих корреляционную связь с устанавливаемыми строительными параметрами. Тогда первые будут являться факторами признака, а вторые – факторами результата.

Алгоритм изучения и установления корреляционных связей для оперативного определения строительных показателей грунтов:

изучение однородности представленных данных для решения вопроса о применении предлагаемого метода (проверка условия однородности, условий применения используемых в математическом обеспечении теорем);

определение наиболее точной модели зависимости строительных параметров

грунтов от принятых вариантов их комплексных (квалификационных) показателей, зависящих от значений выборок;

установление тесноты связи между значениями, полученными предлагаемым методом оперативного определения геотехнического показателя грунта и результатами стандартного инструментального метода.

Рассмотрим этапы моделирования каждого из разделов.

1 этап. Поскольку корреляционная связь является статистической, первое условие ее изучения – это наличие данных по достаточно большой совокупности явлений, условие, общее для всякого статистического исследования. Если число наблюдений значительно больше числа факторов, то с увеличением объема выборки вероятность появления больших ошибок уменьшается (чем больше обследуется единиц, тем меньше будет величина расхождений выборочных и генеральных характеристик). Таким образом, получение более точных оценок параметров будет тем надежнее, чем больше элементов выборки будет рассмотрено.

Для обоснования утверждения о точных (не интервальных) оценках используется утверждение закона больших чисел, т. е. для последовательности независимых случайных величин $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n$, имеющих математические ожидания $M\xi_k = a_k, k = 1, 2, \dots, n$ и ограниченные в совокупности дисперсии ($D\xi_k < \text{const}$ сразу для всех k), имеем:

$$P\left(\left|\frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n}{n} - \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n}\right| \geq \varepsilon\right) \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

где ε – сколько угодно малая величина.

Более точные оценки можно получить с помощью теоремы Линдеберга: при достаточно большом числе независимых наблюдений ($n \rightarrow \infty$) получаем, что

$$P\left(\left|\frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n - \sum_{k=1}^n a_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^n D\xi_k}}\right| \leq x\right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

где x – действительное число.

Из этой теоремы следует вывод: при достаточно большом числе независимых

наблюдений распределение отклонений выборочных средних от генеральной средней, а следовательно, и самих выборочных средних, асимптотически нормально. Однако для использования данного результата необходимо выполнение так называемого условия Линдеберга, которое на практике исследователями игнорируется (условие Линдеберга: для всякого $\varepsilon > 0$ при $n \rightarrow \infty$ должно выполняться

$$\frac{1}{D_n} \sum_{k=1}^n \int_{|x-a_k| \in D_n} (x-a_k)^2 dF_k(x) \rightarrow 0,$$

где $D_n = \sum_{k=1}^n D\xi_k$).

Вторым условием установления закономерной корреляционной связи служит необходимость обеспечивать надежное выражение закономерности. Кроме большого числа единиц совокупности, для этого необходима достаточная качественная однородность совокупности. Нарушение этого условия может извратить параметры корреляции. Математическое обеспечение для данного анализа базируется на результатах, полученных Лексисом и Крамером [5].

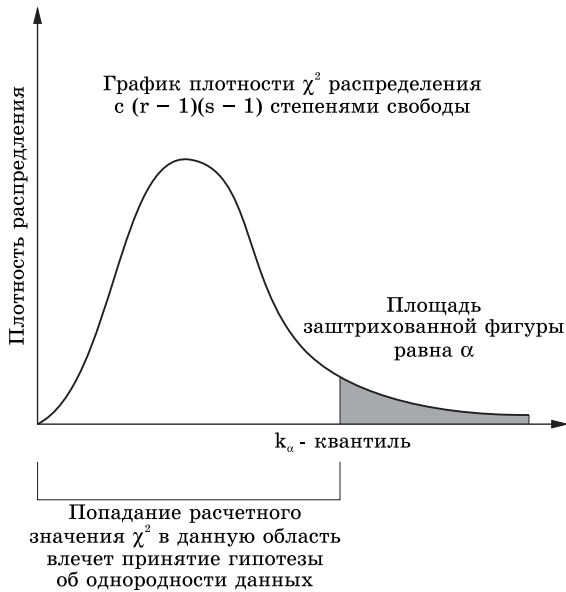
Предположим, что осуществлено s последовательных рядов экспериментов, состоящих соответственно из n_1, n_2, \dots, n_s единичных наблюдений (числа n_j не случайные, а заданные). В каждом эксперименте рассматривается некоторый переменный признак, и результаты каждого ряда наблюдений разбиваются по значениям этого признака на r групп. Пусть число результатов наблюдений в i -й группе j -го ряда обозначено как v_{ij} .

Проверим гипотезу о том, что s выборок, представляемых столбцами таблицы, извлечены из одной и той же совокупности, т. е. данные однородны. Вычислим расчетное значение критерия Пирсона χ^2 (хи-квадрат):

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{\left(v_{ij} - \frac{v_{\text{гор-}i} n_j}{n}\right)^2}{v_{\text{гор-}i} n_j}.$$

Если данные однородны, то полученное значение должно быть реализацией случайной величины, имеющей χ^2 -распределение с $(r-1)(s-1)$ степенями свободы. Задав вероятность статистической ошибки первого рода α , определим квантиль $k_\alpha \chi^2$ -распределения с

$(r - 1)(s - 1)$ степенями свободы для уровня значимости $(1 - \alpha)$. Гипотеза об однородности принимается, если расчетное значение $\chi^2 < k_\alpha$ (рисунок).



Применение статистической гипотезы для определения однородности данных

2 этап. Одним из требований, предъявляемым к построению методики, является доступность применения: реализация математических выводов должна быть автоматизированной и приемлемой для широкого пользователя, программное обеспечение – тривиальным или распространенным. Этим условиям удовлетворяет Microsoft Excel. Укажем математическое обоснование процедуры построения функциональной зависимости строительных параметров от комплексных показателей, являющихся результатами алгебраических преобразований, производимых над статистическим данными исследования грунтов. Пусть $(t_1, x_1), (t_2, x_2), \dots, (t_n, x_n)$ – зафиксированные значения пары (значение комплексного показателя, значение строительного параметра). Функция $x = x(t)$ – искомая зависимость параметра x от комплексного показателя t . Вид этих функций выбираем из некоторого класса функций, содержащих линейные, логарифмические, степенные, экспоненциальные и полиномиальные функции.

Общий вид предлагаемых семейств следующий.

1. Двухпараметрическое семейство линейных функций, параметры a_1, a_0 :
 $x_1(t) = a_1 t + a_0$.

2. Двухпараметрическое семейство логарифмических функций, параметры a_1, a_0 :

$$x_2(t) = a_1 \ln t + a_0.$$

3. Двухпараметрическое семейство экспоненциальных функций, параметры a_1, a_0 :

$$x_3(t) = a_1 e^{a_0 t}.$$

4. Двухпараметрическое семейство степенных функций, параметры a_1, a_0 :

$$x_4(t) = a_1 t^{a_0}.$$

5. Многопараметрическое ($n + 1$ параметр) семейство полиномиальных функций, параметры a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 :

$$x_5(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_0.$$

Использование последнего семейства малопригодно, так как часто возникают случаи экстраполяции данных (т. е. аналитического приближения значений t , лежащих вне границ рассматриваемого множества данных значений t_k). Наличие высоких степеней предполагает резкое изменение значений функции x при удалении от рассматриваемого множества, в котором лежат t_k , а это не всегда соответствует действительности.

Вычисление параметров функций $x_i(t)$ производится следующим образом:

Случай линейной функции x_1 . Для определения параметров a_1, a_0 применим метод наименьших квадратов, который состоит в минимизации функции $D(a_1, a_0)$, определяемой как суммы квадратов разностей между наблюдаемыми x_k при заданном t_k значениями и значениями $x_1(t_k)$, вычисленными по заданной формуле:

$$D(a_1, a_0) = \sum_{k=1}^n (a_1 t_k + a_0 - x_k)^2 \rightarrow \min.$$

Производя дифференцирование по a_1 и a_0 и приравнявая полученные частные производные к нулю, получим систему линейных уравнений относительно a_1, a_0 :

$$\begin{cases} (\sum_{k=1}^n t_k^2) a_1 + (\sum_{k=1}^n t_k) a_0 = (\sum_{k=1}^n x_k t_k); \\ (\sum_{k=1}^n t_k) a_1 + n a_0 = (\sum_{k=1}^n x_k). \end{cases}$$

Применяя правило Крамера, используемое для решения систем линейных уравнений, получим явный вид для коэффициентов a_1, a_0 :

Исследование корреляционных связей, установление параметров их уравнений и меры тесноты выполняется с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Данное обеспечение позволяет исследовать и получать тренды для всех выше указанных семейств с вычисленным значением R^2 .

3 этап. Для иллюстрации качества оценки параметров будем использовать графическое представление корреляционной связи в виде так называемой линии эмпирической регрессии. Она составлена из точек, абсциссами которых являются значения признака-фактора, полученные стандартным инструментальным методом, а ординатами – значения признака-результата, полученные предложенным методом оперативного определения геотехнического показателя грунта. Эмпирическая линия регрессии отражает основную тенденцию рассматриваемой зависимости. Если она по своему виду приближается к биссектрисе первого координатного угла ($y = x$), то предполагается наличие линейной корреляционной связи между признаками. Если характер расположения точек по результатам проверки указывает на линейность регрессии вида $y_{оп} = a + bx$, то исчерпывающая характеристика косвенного метода получается после оценки значимости коэффициентов уравнения. Если параметр a существенно не отличается от ожидаемого значения $a = 0$, то косвенный метод свободен от систематической ошибки. Если угловой коэффициент не отличается существенно от ожидаемого значения $b = 1$, то оперативный метод свободен от ошибки, изменяющейся пропорционально самому показателю (степени исследуемого свойства грунта). Следовательно, при подтверждении гипотезы линейности можно считать, что разработанный метод не имеет иных ошибок, кроме случайных. Обычно относительные погрешности в практических

сравнениях (расчетах) характеризуются значениями порядка 5...15 % в зависимости от характера величины [5].

1. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве: РД 34.15.073 91. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991. – 436 с.

2. Типовое положение о службе геотехнического контроля в энергетическом строительстве. – М.: Информэнерго, 1987. – 118 с.

3. **Жарницкий В.Я.** Обеспечение качества и надежности каменно-земляных плотин при строительстве. – Иваново: Изд-во ИГЭУ имени В.И. Ленина, 2005. – 156 с.

4. **Клемяционок П. Л.** Косвенные методы определения показателей свойств грунтов. – Л.: Стройиздат (Ленингр. отд.), 1987. – 143 с.

5. **Крамер Г.** Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

Материал поступил в редакцию 20.12.11.

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью»
Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru

Силкин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты»

Тел. 8-916-510-43-64

Жарницкая Надежда Федоровна, старший преподаватель

Тел. 8-909-249-87-20