

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 001.891.5:624.15

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2020 г. К. В. Кургузов^{1,*}, И. К. Фоменко^{1,**}, О. Н. Сироткина^{1,***}¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, 117997 Россия

*e-mail: kurgusov@yandex.ru

**e-mail: ifolga@gmail.com

***e-mail: onsirotkina@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2019 г.

После доработки 6.12.2019 г.

Принята к публикации 18.12.2019 г.

Отсутствие полноты информации о составе, строении и свойствах литотехнических систем и законах проходящих процессов зачастую вызывает вопросы при строительстве объекта. Сбор, накопление и анализ данных, как правило, сопровождаются ошибками измерения, искажающими скудную информацию об инженерно-геологических условиях; механизмы поведения или разрушения объектов остаются не очевидными. С этим непосредственно связана неочевидность использования той или другой математической модели или расчетной методики. Данная проблематика усугубляется пространственно-временной случайной природой эндогенных и экзогенных процессов, воздействующих на литотехнические системы (ЛТС). Эти и многие другие факторы характеризуют неопределенность инженерно-геологических условий, в общем, и геотехнической модели в частности. В статье анализируется понятие – “неопределенность литотехнических систем”. Дается его определение, рассматриваются виды неопределенностей. Предлагаются варианты систематизации факторов неопределенности. Описаны основные подходы к оценке неопределенности ЛТС. Рассмотрена необходимость вероятностно-статистического подхода к учету факторов инженерно-геологической неопределенности. Делается вывод, что количественный учет неопределенности посредством формирования и расчета моделей неопределенностей, учитывающих многомерные поля случайных величин, для анализа литотехнических систем не только целесообразен, но и необходимый процесс в современной инженерно-геологической практике.

Ключевые слова: литотехническая система (ЛТС), неопределенность, вероятностно-статистический подход, геостатистика, стохастическая геотехника

DOI: 10.31857/S0869780920020071

ВВЕДЕНИЕ

На развитие процессов/явлений и формирования физико-механических параметров грунтов в геологии оказывают широкое воздействие различные случайные факторы. Другими словами, геологический процесс не является полностью детерминированным [2]. Геологические параметры, если их рассматривать в пространственно-временном аспекте, представляют собой композиции детерминированных и случайных полей, которые можно описать при помощи распределения вероятностей на широком ансамбле реализаций [3]. При этом очевидно, что невозможно в точности воспроизвести реализацию поля геологического параметра. Под реализацией понимают вид случайного поля, получаемый в результате проведения одного испытания. Выражение поля

геологического параметра, в общем виде, может быть записано следующим образом:

$$R(\xi, t) = M[R(\xi, t)] + \Delta R(\xi, t), \quad (1)$$

где R – геологический параметр; $M[R(\xi, t)]$ – неслучайная компонента поля, его математическое ожидание; $\Delta R(\xi, t)$ – случайная компонента поля; ξ – вектор координат пространства; t – время.

Отсутствие полноты информации о составе, строении и свойствах литотехнических систем, о законах проходящих процессов, зачастую вызывает вопросы при строительстве объекта. Сбор, накопление и анализ данных, как правило, сопровождаются ошибками измерения, искажающими скудную информацию об инженерно-геологических условиях. В большинстве случаев, механизмы поведения или разрушения остаются не очевидными. С этим непосредственно связана

неоднозначность использования той или другой математической модели или расчетной методики. Данная проблематика усугубляется пространственно-временной случайной природой эндогенных и экзогенных процессов, воздействующих на литотехнические системы. Эти и многие другие факторы характеризуют неопределенность инженерно-геологических условий, в общем, и геотехнической модели, в частности. Неуверенность, неопределенность инженерно-геологической информации толкает проектировщиков, а за ними и строителей на сверхнадежные технические решения, использование самых надежных фундаментов, конструктивных элементов сооружений, применение дополнительных коэффициентов запаса [8]. Все это говорит о необходимости учета случайных компонент анализируемых процессов или свойств посредством выполнения стохастических расчетов при подготовке объектов строительства.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ПОНЯТИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛТС

С философской точки зрения понятие “неопределенность” тесно связано с такими категориями как “случайное и закономерное”, анализу взаимосвязи которых посвящено значительное число работ. По проблеме соотношения этих категорий высказывались, по крайней мере, три различные точки зрения [4]:

1) крайняя позиция, отрицающая случайные процессы в окружающем нас мире, отстаиваемая детерминизмом;

2) позиция, допускающая наличие одновременно и случайных (стохастических — от греч. *stochasis* — догадка, вероятность), и закономерных процессов, причем степень их вероятности может быть разной, в пределе приближающейся к закономерности;

3) другая крайняя позиция, рассматривающая случайные процессы как особые, имеющие совершенно иную природу, чем детерминированные.

Неопределенность является важной причиной категории, обуславливающей необходимость возникновения вероятностно-статистических подходов. Изучение и анализ неопределенности решаемой задачи сводится к двум задачам: 1) к построению расчетной модели неопределенности с количественным описанием различных аспектов, и 2) к последующему учету данной модели в стохастическо-детерминированных расчетах геотехнических систем. Изучение аспектов неопределенности, их обстоятельный анализ, позволяет лучше понимать геологические процессы и явления. Существуют различные классификации аспектов категории неопределенности

стохастических расчетных систем, которые в общем виде сводятся к двум видам:

1. Алеаторная (онтологическая) неопределенность — связана с фундаментальными свойствами, а именно со случайным характером изучаемых процессов;

2. Эпистемическая (гносеологическая) неопределенность связана с отсутствием достаточных знаний о процессах и неточностью моделей, описывающих данные процессы.

Существует множество различных классификаций понятий неопределенности ЛТС. В соответствии с европейским стандартом геотехнического проектирования Еврокод 7, неопределенность связывают непосредственно с расчетными моделями, точнее с элементами расчетных стохастических моделей [27]:

— факторы воздействия на геотехнические модели — нагрузки и воздействия, классификация и учет которых основывается на общепринятых квазивероятностных подходах теории надежности и методов предельных состояний;

— вариативность физико-механических характеристик грунтов. Данный элемент включает природную анизотропию грунтовых параметров, ограниченность данных об исследуемой площадке строительства, качество инженерно-геологических изысканий и ошибки экстраполяции данных исследуемой выборки на генеральную совокупность;

— геометрические параметры объектов исследования, которые связаны с геоморфологическими условиями площадки, геометрией инженерных сооружений, а также геологическими аномалиями — системой трещин скальных пород, карстовые полости и пр.;

— неопределенность достоверности расчетных моделей, под которой подразумевается несовершенство описанных механизмов геологических процессов.

Другая классификация элементов неопределенности ЛТС подразумевает всего три основных элемента [25]:

— фундаментальная (природная) неопределенность, связанная с неоднородностью физико-механических свойств грунтов и randomness геологических процессов;

— неопределенность достоверности расчетных моделей подразумевает ограниченность применения математических моделей сопротивления систем или нагрузок и воздействий, в силу граничных условий и системы расчетных допущений;

— статистическая неопределенность, под которой следует понимать статистические ошибки при определении параметров грунтов и инженер-

но-геологических процессов, и прогнозные статистические ошибки.

Еще одна классификация предложена другим автором [23], в ней неопределенность ЛТС характеризуется следующими аспектами:

- риск неизвестности инженерно-геологических условий;
- риск неправильного применения расчетной модели;
- риск превышения напряжений расчетных значений;
- ошибки в силу человеческого фактора;
- ошибки в силу существенных изменений проектных параметров;
- значительное “перестрахование” в выборе нормативных физико-механических характеристик на этапе инженерно-геологических изысканий – риск искажения данных об инженерно-геологических условиях.

Более подробная классификация неопределенности ЛТС приведена в работе [26], которая рассматривает следующие факторы:

- природная неоднородность грунтов (гетерогенность, стратиграфия);
- геологические аномалии;
- малая изученность площадки строительства (малый объем инженерно-геологических изысканий);
- ошибки измерения;
- статистическая (описательная и прогнозная) неопределенность;
- стационарная неопределенность связана с изменением свойств и состояний грунтов во времени;
- неопределенность достоверности (адекватность) расчетных моделей (эмпирических, аналитических, численных). Малое понимание механизмов поведения и разрушения грунтов, что проявляется в расчетных допущениях или упрощениях математических (аналитических) моделей;
- неопределенность решений (человеческий фактор) – субъективность экспертных оценок относительно выбора методов расчета, предположений о возможных механизмах возникновения отказов, интерпретация анализа исходных данных и результатов расчета и т.п.

Безусловно, неопределенность – сложное и даже философское понятие, природа которого чрезвычайно сложна и у которого может быть множество определений и трактований. Однако, так или иначе, неопределенность – понятие, отражающее отсутствие однозначности в развитии процесса, а также отсутствие или недостаток информации о чем-либо. Под неопределенностью, здесь мы будем понимать ситуацию неоднознач-

ности или неполноты информации при принятии решений [10, 13].

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛТС

Неопределенность в инженерной геологии должна рассматриваться не только как философско-дискуссионная концепция, а как научно-прикладная категория, подлежащая количественному измерению, математической формализации. В настоящее время количественная оценка факторов неопределенности производится с помощью различных математических подходов: теории нечетких множеств, теории возможностей, теории вероятности, комбинированных подходов. При этом вероятностно-статистическая методология наиболее часто используется в инженерно-геологической и геотехнической практиках. Она позволяет описывать и количественно учитывать случайные факторы распределения физико-механических свойств или геологических процессов. Существует два подхода к методам формализации неопределенности исходных данных [5, 10, 16]:

1. “Подавление” (минимизация) влияния неопределенности посредством “фильтрации” данных, укрупнение информации с последующим использованием при принятии решений детерминированных алгоритмов.

2. Использование специальных, недетерминированных алгоритмов анализа и учета данных (например, вероятностно-статистические подходы).

Первый подход используется в действующих нормах, в методе предельных состояний. Случайные и неопределенные факторы учитываются системой нормативных коэффициентов. Эта модель является основной для традиционных расчетов надежности конструкций и их элементов, оценки нормативного риска и идентификации параметров.

Несмотря на широкое распространение, данный подход имеет существенные ограничения. Не учет случайной компоненты в структуре численных оценок геологического параметра (использование чисто детерминированных моделей) неизбежно приводит к ошибочным результатам.

В этой связи остановимся на втором – вероятностно-статистическом подходе. Вероятностно-статистический подход – обобщающее понятие статистической геотехники, в целом, он непосредственно затрагивает целый ряд математических дисциплин (теория вероятностей, комбинаторика, математическая статистика, теория надежности), а также набор прикладных дисциплин (теория нагрузок и воздействий, инженерная

геология, механика грунтов, строительная механика и пр.).

Неопределенность различных факторов при решении инженерно-геологических и геотехнических задач является мотивирующей силой в развитии вероятностных подходов в расчетах, потому что уровень неопределенности – существенный аспект в системах принятия технических решений, и непосредственно отражается на технико-экономических показателях объекта. Ошибки принятия решений зачастую имеют серьезные социально-экономические или экологические последствия [10].

Так как неопределенность тесно связана с понятием случайной величины и ее вероятностной природой, то для более достоверной оценки задач инженерной геологии необходимо рассчитывать не только детерминированную компоненту инженерно-геологического процесса, но и его случайную составляющую. Детерминированный расчет позволяет получить единичное, частное значение определяемого параметра, он не учитывает случайную природу исследуемого процесса, не позволяет анализировать вариативность параметра генеральной совокупности. Исследование случайной природы, анализ исследуемой совокупности, нахождение функции распределения и ее параметров позволяет выполнять вероятностная методология [9]. Таким образом, любой детерминированный расчет есть частный случай вероятностно-статистического расчета. Вероятностный подход как количественная мера позволяет систематизировать процесс принятия решений посредством структурного анализа случайных полей [18, 20].

Вероятностно-статистическая методология для анализа различных задач инженерной геологии, как научное направление, сформировалось еще в середине прошлого века. В нашей стране это направление получило достаточно широкое развитие в 1960–1970 гг., благодаря таким ученым как Болотин В.В., Пшеничкин А.П., Ржаницын А.Р., Вистелиус А.Б. и пр. [1, 6, 7, 14, 15]. Заслуживает внимания мнение, с которым мы не можем не согласиться, известного автора А.Б. Вистелиуса [6], что использование математической статистики в геологии имеет не только прикладной характер, и то, что методы этой научной дисциплины могут привести к результатам, неизвестным ранее геологической науке и важным для ее развития.

Один из главных факторов неопределенности ЛТС – фактор гетерогенности конструктивных материалов и грунтов. Характеристики грунтов (в отличие от конструктивных материалов) не могут быть приняты на высоком уровне достоверной вероятности в силу большой неоднородности и ограниченности исследуемой выборки. Напри-

мер, Еврокод 7 никак не регламентирует процесс выбора расчетных параметров грунта, ни в качестве средней величины, ни в качестве оценок доверительных вероятностей. Поэтому выбор и оценка параметров грунтов производится только на основании качественных экспертных оценок в зависимости от объема и качества проведенных исследований грунтов, сложности инженерно-геологических условий, уровня ответственности сооружения и др. Субъективность таких оценок очевидна, так как различные специалисты по разному выбирают грунтовые параметры в зависимости от опыта (удачного или неудачного), уровня квалификации или своих мотивов [27]. Плохая статистическая обработка грунтов вкупе с существенной дисперсией (разбросом) результатов дают возможность для широкого трактования их характеристик. Результаты проектирования, а значит и проектные показатели эффективности существенным образом зависят от выбора значений физико-механических характеристик.

Существенная вариативность физико-механических характеристик грунтов, неоднородность состава и свойств, физическая и геометрическая анизотропия, занимают важное место при выполнении расчетов и анализе данных. Для описания гетерогенности грунтов могут быть использованы графические инструменты, статистические моменты n -го порядка, ковариационные функции, методы геостатистики и пр.

Неопределенность достоверности модели может быть выражена через обобщенный коэффициент достоверности (K_M), который рассчитывается на основании сопоставления расчетных данных с фактическими данными:

$$K_M = \frac{R_p}{R_\Phi}, \quad (2)$$

где, R_p – расчетный показатель сопротивления конструктивного элемента, R_Φ – фактическое значение сопротивления конструктивного элемента, полученного по результатам испытаний.

Коэффициент достоверности не определяется по данным частного значения, а должен рассчитываться только по результатам серии испытаний после статистической обработки, включая предварительный графический анализ данных, выявление случайных величин, расчет генеральных статистик, оценки функций распределения и пр. (рис. 1). При этом при расчете коэффициента K_M , необходимо учитывать возможное влияние фактора гетерогенности и анизотропии грунта, ошибок измерений и пр. [19].

Очевидно, что для абсолютно достоверной расчетной модели, результаты статистической обработки дадут среднее значение K_M равным единице, а значения стандартного отклонения

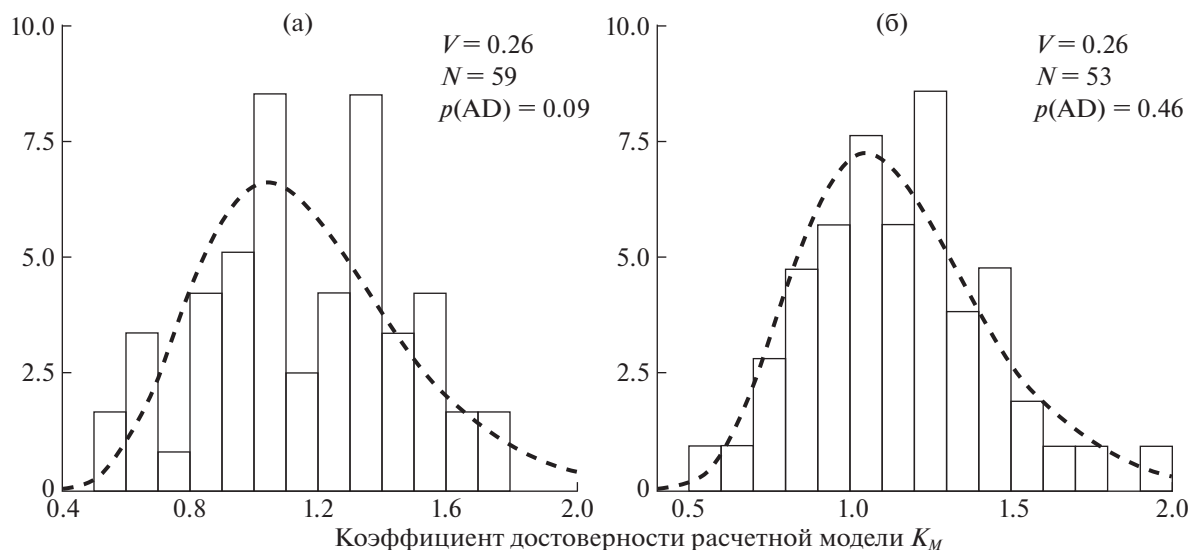


Рис. 1. Гистограмма распределения значений коэффициента достоверности K_M расчетных моделей оценки несущей способности свайных фундаментов по критерию $p(AD)$: а – при величине $p(AD) = 0.09$, б – при величине $p(AD) = 0.46$. Обозначения на рисунке: V – коэффициент вариации, N – число определений несущей способности свай, $p(AD)$ – критерий согласия нормальному распределению Андерсена–Дарлинга.

будут равны нулю. Таким образом, неопределенность математических методик и моделей снижается за счет уточнения результатов расчетов с использованием таких моделей.

Демонстрацию использования коэффициента достоверности можно показать на примере сопоставления методик расчета свай. Давно известна в профессиональном инженерно-геологическом и геотехническом сообществе проблематика неопределенности работы свайных фундаментов и связанных с этим расчетных методов [11, 12]. Даже при получении значений несущей способности свай по результатам полевых статических испытаний, неизбежно сохраняется неопределенность значений несущей способности свай на смежных соседних участках. Иногда, значения несущей способности могут существенно отличаться у двух, вблизи расположенных свай, и практически совпадать со сваями, расположенными на противоположных границах участка строительства. Такая пространственная неопределенность может быть связана и с количеством испытанных свай, и со сложностью инженерно-геологических условий участка, и с видом используемых свай, и с технологией изготовления и пр. Коэффициент вариации (V) значений несущей способности по данным статических испытаний в среднем, составляет 20–30%, достигая в некоторых случаях 50% и более [21].

В работе А.Р. Galbraith [21] показано, что оценка коэффициента вариации значений несущей способности в основном зависит от следующих факторов:

- от количества испытанных свай. Чем больше количество, тем ниже V ;
- от диаметра свай – значение V снижается при увеличении диаметра свай;
- от качества и полноты выполненного испытания.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента вариации несущей способности свай от величины осадки испытываемой сваи (ϵ) при выполнении статического испытания.

$$\epsilon = \frac{\delta_{\max}}{D}, \quad (3)$$

где $\delta_{\max}$ – полная осадка сваи, D – размер сечения сваи (приведенного диаметра).

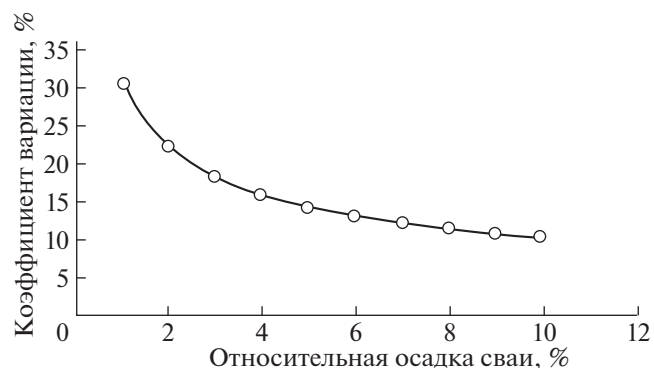


Рис. 2. Зависимость коэффициент вариации несущей способности свай от величины осадки испытываемой сваи.

Т.е. чем качественнее проводилось статическое испытание, чем больше выполнялось погружение сваи при испытании, тем достоверней получался результат.

Ошибки измерения при выполнении статических испытаний свай также имеют место, и в среднем коэффициент вариации составляет 10–15% [20].

Существующие методики по расчету свайных фундаментов имеют свои области применимости и не могут быть использованы повсеместно, т.е. они не обладают универсальностью. Ниже (табл. 1) представлены результаты достоверности расчетных методик по оценке несущей способности свай с приведением значений K_M .

Таким образом, необходимо понимать, что для использования вероятностно-статистической методологии существует принципиальная возможность информационного обеспечения различных факторов неопределенности в количественном выражении, в том числе для любых компонент инженерно-геологических условий и литотехнических систем. При этом следует иметь в виду, что использование количественных параметров не говорит об игнорировании качественных характеристик, лишь дает возможность их более точного и всестороннего описания [17].

Вероятностно-статистическая методология расчетов ЛТС сегодня имеет весьма широкую область применения. К ней могут относиться такие аспекты как:

- статистическая обработка первичных данных инженерно-геологических изысканий, полевых и лабораторных испытаний грунтов, с учетом целей и задач расчетного обоснования проектных решений и требований к пространственному анализу данных;

- на базе аппарата количественного моделирования пространственных данных (количественного анализа гетерогенности грунтов, пространственной анизотропии физико-механических характеристик грунтов) возможно существенное перестроение методологии инженерно-геологических изысканий;

- построение пространственно-корреляционных моделей исследуемой области литосферы с выполнением анализа информационного массива данных с целью последующей обработки и построения стохастических расчетных моделей ЛТС или имплементации данных в информационно-цифровую модель объекта (концепция ВІМ проектирования);

- исследование многомерных случайных полей функций нагрузок и воздействий, а также полей функций сопротивления ЛТС;

- разработка стохастических моделей с учетом объектного уровня неопределенности, аналити-

ческой или численной формы с целью совместного расчета на основе детерминированных функций поведения или разрушения грунтов;

- расчет и анализ композиционных стохастическо-детерминированных расчетных моделей; вариационный анализ случайных функций;

- является методологической основой для дальнейшего развития инженерных расчетных методов на основе теории предельных состояний за счет адаптации (калибровки) коэффициентов надежностей, а также основой для замещения этой теории при расчетах особо ответственных и уникальных зданий и сооружений;

- идентификация, количественный и качественный анализ рисков проектов (опасностей, природного потенциала) и др.

Один из самых цитируемых недостатков данной методологии – весьма высокий уровень “психологического барьера”, обусловленный, во-первых, достаточно сложным, а главное незнакомым для большинства выпускников технических ВУЗов математическим аппаратом математической статистики и базовым курсом теории надежности, во-вторых – отсутствием нормативного регулирования вероятностных подходов в практике проектирования и строительства. Снижение такого барьера является комплексной задачей, решение которой возможно исключительно в долгосрочной перспективе. Например, одним из способов внедрения и продвижения данной методологии может стать демонстрация практических примеров с ее использованием [28]. Еще один существенный ее недостаток в практическом применении – дефицит адекватных исходных параметров, характеризующих состояние и поведение ЛТС [22].

ВЫВОДЫ

Неопределенность ЛТС является важной, причинной категорией в инженерной геологии. Неопределенность инженерно-геологических условий при создании ЛТС влияет на ее уровень надежности. Не учет случайной компоненты в структуре численных оценок геологического параметра (использования чисто детерминированных моделей) неизбежно приводит к ошибочным результатам. В сравнении с детерминированным подходом вероятностно-статистический подход обладает объективностью и гибкостью, так как позволяет учитывать большое количество случайных и закономерных факторов без усложнения расчетных детерминированных моделей и позволяет проводить расчет надежности системы “сооружение–основание” в разнообразных грунтовых условиях с учетом различных факторов, влияющих на параметры нагружения и сопротивления системы. Поэтому формирование моделей

Таблица 1. Значения коэффициентов достоверности расчетных моделей по оценке несущей способности свайных фундаментов [24]

Методы расчетов	Количество точек испытаний	Тип сваи	Вид грунта	K_M	V
β -метод	4	Металлический профиль	Глинистый	0.61	0.61
λ -метод	16			0.74	0.39
α -по Томлинсону	17			0.82	0.4
α -API	16			0.9	0.41
Динамическое зондирование (SPT)	8			1.04	0.39
λ -метод	18	Железобетонная свая	Глинистый	0.76	0.39
α -API	17			0.81	0.36
β -метод	8			0.81	0.31
α -по Томлинсону	18			0.87	0.48
α -по Томлинсону	18	Металлическая труба	Глинистый	0.64	0.5
α -API	19			0.79	0.54
β -метод	12			0.45	0.6
λ -метод	19			0.67	0.55
Динамическое зондирование (SPT)	12			0.39	0.62
Нордлунда	19	Металлический профиль	Песчаный	0.94	0.4
Мейерхофа	18			0.81	0.38
β -метод	19			0.78	0.51
Динамическое зондирование (SPT)	18			1.35	0.43
Нордлунда	36	Железобетонная свая	Песчаный	1.02	0.48
β -метод	35			1.1	0.44
Мейерхофа	36			0.61	0.61
Динамическое зондирование (SPT)	36			1.21	0.47
Нордлунда	19	Металлическая труба	Песчаный	1.48	0.52
β -метод	20			1.18	0.62
Мейерхофа	20			0.94	0.59
Динамическое зондирование (SPT)	19			1.58	0.52
α -по Томлинсону	20	Металлический профиль	Разнообразные	0.59	0.39
α -API	34			0.79	0.44
β -метод	32			0.48	0.48
Динамическое зондирование (SPT)	40			1.23	0.45
α -по Томлинсону	33	Железобетонная свая	Разнообразные	0.96	0.49
α -API	80			0.87	0.48
β -метод	80			0.81	0.38
Динамическое зондирование (SPT)	71			1.81	0.5
Статическое зондирование (CPT)	30			0.84	0.31
α -по Томлинсону	13	Металлическая труба	Разнообразные	0.74	0.59
α -API	32			0.8	0.45
β -метод	29			0.54	0.48
Динамическое зондирование (SPT)	33			0.76	0.38

Примечание. K_M – среднее значение коэффициента достоверности, V – коэффициент вариации.

неопределенностей учитывающих вероятностные функции распределения посредством использования вероятностно-статистических расчетов для анализа ЛТС является не только целесообразным, но и необходимым процессом в современной инженерно-геологической практике.

Очевидно, что в настоящее время вероятностно-статистическая методология (особенно на базе численного моделирования) имеет глубокий потенциал дальнейшего развития. Несмотря на широкую область и внушительный список преимуществ использования вероятностно-статистических подходов в инженерно-геологической практике и геотехническом моделировании, необходимо понимать, что данная методология не может являться заменой традиционных методов. Но она могла бы стать дополнением к устоявшимся практикам изучения и проектирования литотехнических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Болотин В.В.* Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. 255 с.
2. *Бондарик Г.К.* Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
3. *Бондарик Г.К.* Теория геологического поля. М.: ВИМС, 2002. 129 с.
4. *Буслаева О.В., Королев В.А.* Неопределенности в эколого-геологических системах и их систематизация // Инженерная геология. 2013. № 6. С. 56–62.
5. *Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В.* Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб.: Изд-во ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2002. 591 с.
6. *Вистелиус А.Б.* Основы математической геологии. Ленинград: Наука, 1980. 389 с.
7. *Гарагаш Б.А.* Надежность систем “основание–сооружение”. Т. 2. М.: АСВ, 2012. 471 с.
8. *Дмитриев В.В., Ярг Л.А.* Методы и качество лабораторного изучения грунтов. М.: КДУ, 2008. 542 с.
9. *Земцов В.М., Земцова И.В.* Элементы теории вероятностей и математической статистики. М.: АСВ, 2013. 538 с.
10. *Кауфман Б.Д., Шильман С.Г.* Динамика систем сооружения – основание при неполной исходной информации (учет случайных и неопределенных факторов). СПб.: АО “ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева”, 2016. 418 с.
11. *Кургузов К.В., Фоменко И.К.* Сравнительная оценка методов расчета свай на горизонтальную нагрузку // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1280–1291.
12. *Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н.* Оценка несущей способности свай. Методы расчета и проблематика // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 7–25.
13. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 487 с.
14. *Пшеничкин А.П.* Основы вероятностно-статистической теории взаимодействия сооружений с неоднородными грунтовыми основаниями. Волгоград: ВолГАСУ, 2006. 207 с.
15. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
16. *Стефанишин Д.В., Мализдерский Р.Н.* Вероятностная оценка устойчивости береговых упоров арочной плотины Нам Чиен (Вьетнам) в условиях неопределенности // Сб. докл. третьей научно-техн. конф. “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии” / Ред. В.А. Зубакин. СПб.: АО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2008. С. 229–237.
17. *Пендин В.В.* Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. М.: КДУ, 2009. 349 с.
18. *Analyzing Uncertainty in Civil Engineering.* W. Fellin, H. Lessmann, M. Oberguggenberger & R. Vieider (eds.). NewYork: Springer, 2005. 244 p.
19. *Dithinde M. et al* Characterization of Model Uncertainty in the Static Pile Design Formula // J. of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2010. Т. 137. V. 1. P. 70–85.
20. *Fenton G.A., Griffith D.V.* Risk assessment in geotechnical engineering. NewJersey: WILEY, 2008. 480 p.
21. *Galbraith A.P. et al.* Uncertainty in pile resistance from static load tests database // Geotechnical Engineering. 2014. Т. 167. V. 5. P. 431–446.
22. *Lee I.K. et al.* Geotechnical engineering. Boston: Pitman, 1982. 432 p.
23. *McMahon B.K.* Geotechnical Design in the face of uncertainty // Australian Geomechanics. 1985. № 10. P. 7–19.
24. *National cooperative highway research program (NCHRP) / Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations, REPORT 507.* WASHINGTON: Transportation Research Board, 2004. 77 p.
25. *Probabilistic methods for structural design / Guedes Soares, Carlos (Ed.).* Lisbon: Springer science, 1997. 408 p.
26. *Russelli C., Vermeer P. A.* Probabilistic methods applied to geotechnical engineering. V. De Gennaro, J.-M. Pereira & P. Delage (eds.) // 2nd Int. Workshop of Young Doctors in Geomechanics (WHYDOC), Champs-sur-Marne, Paris, 2005. P. 361–366.
27. *Trevor L.L. Orr.* How Eurocode 7 addresses uncertainty, risk and decision making in geotechnical design / M.Beer, Siu-Kui Au & J.W.Hail (eds.) // Second Int. Conf. on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and the Sixth Int. Symp. on Uncertainty, Modeling, and Analysis (ISUMA). Liverpool, ASCE Press. 2014. V. 4. P. 2419–2428.
28. *Whitman R.V.* Evaluating calculated risk in geotechnical engineering // Geotechnical engineering ASCE. 1984. Col. 110. № 2. P. 145–188.

PROBABILISTIC AND STATISTICAL APPROACHES TO UNCERTAINTY ASSESSMENT IN LITHOTECHNOGENIC SYSTEMS

K. V. Kurguzov^{a,#}, I. K. Fomenko^{a,##}, and O. N. Sirotkina^{b,###}

^a Russian State Geological Prospecting University, ul. Miklukho-Maklaya, 23, Moscow, 117997 Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia

[#]e-mail: kurgusov@yandex.ru,

^{##}e-mail: ifolga@gmail.com,

^{###}e-mail: onsirotkina@gmail.com

Uncertainty as a multidisciplinary scientific category has been an object of scrutiny for a long time. High level of uncertainty is a distinctive feature of geology among other sciences. The study, analysis and discussions of this category remain for the most part in rhetorical or philosophical fields; however, there is a direct requirement to quantify this category in the engineering geology practice. Uncertainty is understood as an ambiguous property because of lacking information about engineering geological conditions. This definition arises a question, if the uncertainty relates to information, could it be fully considered quantitatively? There's a fact that various random factors influence geological processes and soil (rocks) properties. In other words, geological processes are not completely deterministic. Geological processes and soil properties pertain to time and spatial composition of deterministic and random multivariate fields. Uncertainty is an inherent feature of engineering geology and geotechnical engineering. But almost all engineering tasks are being solved with deterministic applications, without considering random factors quantitatively. Today the design methodology is based on a limit state design concept, which is considered as a semi-probabilistic procedure. It involves the application of various partial reliability factors to produce structures able to withstand against the occurrence of ultimate and serviceability loadings (ULS and SLS). Apparently, this limit state design methodology is unable to provide the process of assembling the structure with defined level of reliability, for it doesn't consider the random nature of site condition, engineering geology processes, soils variability, structural loads, etc. All these uncertainty factors and random nature of geological processes could be envisaged with an application of probability theory, statistics, as well as geostatistic. For quantitative uncertainty consideration it's required to analyze various factors separately such as loads, variability of soil properties, uncertainty of mathematical models, geology geometry (stratigraphy, geomorphology etc.). Various classifications of the geology uncertainty are shown in the article. In general, uncertainty, as a category, could be subdivided in two types: aleatoric (ontological) uncertainty that deals with a physical nature of processes; and epistemic (gnostic) uncertainty that pertains to lack of knowledge of physical processes. The quantitative consideration of uncertainty factors allows us to create the uncertainty model for the analyzed construction site (a random model). In geotechnical practice, failures do occur sometimes. Attributing them to a residual risk or a faulty execution of the project does not properly cover the range of causes. A closer scrutiny of the design, the engineering model, the data, the soil-structure interaction and the model assumptions are required. Usually, the uncertainties in initial and boundary conditions as well as material parameters are abundant. Deterministic methodology which is a basis for current norms and regulations is unable to analyze all the reasons that pertain to uncertainty, causing an engineer to leave the issue aside. Research and analysis of this complex category in the article reveals a high demand for thorough application of stochastic methods in geotechnics. Unfortunately, it still does not have a broad usage in practice, due to various circumstances. Moreover, among geotechnical engineers, who are used to deterministic calculations, there's an opinion could be met that such category as uncertainty could hardly be assessed and estimated if at all. All these remind us of actuality of the subject.

Keywords: lithotechnical system, the uncertainty of LTS, probabilistic approach, geostatistics, stochastic geoengineering

REFERENCES

1. Bolotin, V.V. *Primenenie metodov teorii veroyatnostei i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii* [Application of the methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. Moscow, Izd-vo literatura po stroitel'stvu, 1971, 255 p. (in Russian)
2. Bondarik, G.K. *Obshchaya teoriya inzhenernoi (fizicheskoi) geologii* [General theory of engineering (physical) geology]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 256 p. (in Russian)
3. Bondarik, G.K. *Teoriya geologicheskogo polya* [Geological field theory]. Moscow, VIMS Publ., 2002, 129 p. (in Russian)
4. Buslaeva, O.V., Korolev, V.A. *Neopredelennosti v ekologo-geologicheskikh sistemakh i ikh sistematizatsiya* [Indeterminacies in the environmental-geological systems and their systematization]. *Inzhenernaya geologiya*, 2013, no. 6, pp. 56–62. (in Russian)
5. Veksler, A.B., Ivashintsov, D.A., Stefanishin, D.V. *Nadezhnost', sotsial'naya i ekologicheskaya bezopasnost' gidrotekhnicheskikh ob'ektov: otsenka riska i prinyatie reshenii* [Reliability, social and environmental safety of

- hydraulic facilities: risk assessment and decision-making]. St.Petersburg, OAO "VNIIG im. B.E.Vedeneeva" Publ., 2002, 591 p. (in Russian)
6. Vistelius, A.B. *Osnovy matematicheskoi geologii* [Fundamentals of mathematical geology]. St.Petersburg, Nauka Publ., 1980, 389 p. (in Russian)
7. Garagash, B.A. *Nadezhnost' sistem "Osnovanie-sooruzhenie"* [Safety of the basis-engineering structure system], vol. 2, Moscow, ACB Publ., 2012, 471 p. (in Russian)
8. Dmitriev, V.V., Yarg, L.A. *Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov* [Methods and quality of laboratory study of soils]. Moscow, KDU Publ., 2008, 542 p. (in Russian)
9. Zemtsov, V.M., Zemtsova, I.V. *Elementy teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki* [Elements of probability theory and mathematical statistics]. Moscow, ACB Publ., 2013, 538 p. (in Russian)
10. Kaufman, B.D., Shul'man, S.G. *Dinamika sistem sooruzhenie – osnovanie pri nepolnoi iskhodnoi informatsii (uchet sluchainykh i neopredelennykh faktorov)* [Dynamics of construction-base systems with incomplete initial information (accounting for random and uncertain factors)]. St.Petersburg, OAO "VNIIG im. B.E. Vedeneeva" Publ., 2016, 418 p. (in Russian)
11. Kurguzov, K.V., Fomenko, I.K. *Sravnitel'naya otsenka metodov rascheta svai na gorizontol'nuyu nagruzku* [Comparison of calculating methods for laterally loaded piles]. *Vestnik MGSU*, 2019, vol. 14, no. 10, pp. 1280–1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1280-1291
12. Kurguzov, K.V., Fomenko, I.K., Sirotkina O.N. *Otsenka nesushchei sposobnosti svai. Metody rascheta i problematika*. [Calculation of driven pile bearing capacity. Analytical methods and issues]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 7–25. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2294
13. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 487 p. (in Russian)
14. Pshenichkin, A.P. *Osnovy veroyatnostno-statisticheskoi teorii vzaimodeistviya sooruzhenii s neodnorodnymi gruntovymi osnovaniyami* [Bases of probabilistic-statistical theory of interaction of structures with inhomogeneous soil bases]. Volgograd, VoLGASU Publ., 2006, 207 p. (in Russian)
15. Rzhantsyn, A.R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktov na nadezhnost'* [The theory of calculation of building structures on reliability]. Moscow, Stroiizdat, 1978, 239 p. (in Russian)
16. Stefanishin, D.V., Malizderskii, R.N. [Probabilistic assessment of the stability of the shore abutments of the arch dam Nam Chien (Vietnam) under uncertainty]. *Sbornik dokladov 3 nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* "Gidroenergetika. Novye razrabotki i tekhnologii" [Proceedings of 3rd scientific and technical conference "Hydropower. New developments and technologies"]. St.Petersburg, OAO "VNIIG im. B.E.Vedeneeva" Publ., 2008, pp. 229–237. (in Russian)
17. Pendin, V.V. *Kompleksnyi kolichestvennyi analiz informatsii v inzhenernoi geologii* [Complex quantitative analysis of information in engineering geology]. Moscow, KDU Publ., 2009, 349 p. (in Russian)
18. Analyzing uncertainty in civil engineering. Fellin, W., Lessmann, H., Oberguggenberger, M., Vieider, R., Eds., New York, Springer, 2005. 244 p. DOI: 10.1007/b138177
19. Dithinde, M. et al. Characterization of model uncertainty in the static pile design formula. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2010, vol. 137, issue 1, pp. 70–85. doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000401
20. Fenton, G.A., Griffith, D.V. Risk assessment in geotechnical engineering. New Jersey: WILEY, 2008, 480 p. DOI:10.1002/9780470284704
21. Galbraith, A.P. et al. Uncertainty in pile resistance from static load tests database. *Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 167, issue 5, pp. 431–446. doi.org/10.1680/geng.12.00132
22. Lee, I.K. et al. Geotechnical engineering. Boston, Pitman, 1982, 432 p.
23. McMahon, B.K. Geotechnical Design in the face of uncertainty. *Australian Geomechanics*. 1985, no. 10, pp. 7–19.
24. National cooperative highway research program (NCHRP). Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations, Report 507. Washington, Transportation Research Board, 2004, 77 p.
25. Probabilistic methods for structural design. Guedes Soares, C., Ed., Lisbon, Springer science, 1997, 408 p. doi.org/10.1007/978-94-011-5614-1
26. Russell, C., Vermeer, P.A. Probabilistic methods applied to geotechnical engineering. 2nd International Workshop of Young Doctors in Geomechanics (WHYDOC), Champs-sur-Marne, Paris, 2005, pp. 361–366.
27. Trevor, L.L. How Eurocode 7 addresses uncertainty, risk and decision making in geotechnical design. Second International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and the Sixth International Symposium on Uncertainty, Modeling, and Analysis (ISUMA), Liverpool, ASCE Press, 2014, vol. 4, pp. 2419–2428. doi.org/10.1061/9780784413609.243
28. Whitman, R.V. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Geotechnical engineering ASCE*. 1984, col. 110, no. 2, pp. 145–188. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:2(143)