

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 624.154

DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1

## Расчет надежности висячих свай по критерию несущей способности грунта основания фундамента

В.С. Уткин

Вологодский государственный университет (ВоГУ), 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Висячие сваи при действии центральной сжимающей силы по СП 24.13330.2011 рассчитывают по первой группе предельных состояний — по несущей способности (по критериям прочности материала сваи и по критерию несущей способности грунта основания) и по второй группе предельных состояний — по осадке сваи.

**Материалы и методы.** Рассматривается метод расчета надежности висячей сваи по несущей способности грунта основания. Надежность фигурирует как количественная мера безопасности эксплуатации одиночной сваи. В качестве критерия работоспособности сваи принята несущая способность грунта основания. Расчет надежности сваи построен на основе статистической информации, получаемой при испытаниях пробных свай с измерением сил трения на поверхности сваи в слоях грунта и напряжения грунта под нижним концом сваи известными методами, использованными ранее для формирования таблиц значений  $f$  и  $R$  в СП 24.13330.2011. Измерения каждого случайного параметра проводятся не менее трех раз.

**Результаты.** На этой статистической информации построена теория расчета надежности пробной сваи в соответствии с требованиями ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Надежность в результате расчета представляется в интервальном виде. Математическая модель предельного состояния сваи по несущей способности грунта основания заимствована из СП. Установлена связь (формула) между длиной сваи и значением ее надежности как меры безопасности ее работы в грунте основания. Задаваясь длиной сваи или суммой слоев грунта основания, каждый из которых не более 2 м, по механическим свойствам грунта и нагрузкой на сваю, расчетом (методом подбора) находят значение надежности, соответствующей нормативному значению. Алгоритм расчета надежности рассмотрен на приведенных в работе примерах.

**Выводы.** Расчет надежности свай построен на фактической информации о работе сваи в грунте основания по действующим нормативным документам РФ, поэтому предложенный метод расчета надежности висячей сваи может найти применение в практике расчетов надежности свай. Также он может быть использован при расчетах других несущих элементов, в нормативной литературе и в учебной работе строительных вузов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** висячая свая, несущая способность грунта, безопасность, надежность эксплуатации, возможность отказа, длина сваи, нормативное значение надежности, алгоритм расчета надежности

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Уткин В.С. Расчет надежности висячих свай по критерию несущей способности грунта основания фундамента // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 4. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1

## Friction pile reliability analysis with respect to the foundation soil bearing capacity

Vladimir S. Utkin

Vologda State University (VSU), 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Friction pile reliability under the action of the central compressing force according to the Set of Rules 24.13330.2011 is calculated from the first group of the limit states — from the bearing capacity (using the pile material strength criteria and the foundation soil bearing capacity criterion) and from the second group of the limit states — from the pile load-deformation behaviour.

**Materials and methods.** A method of calculating the friction pile reliability from the foundation soil bearing capacity is considered. Reliability appears as a quantitative measure of safety of a single pile operation. The foundation soil bearing capacity is accepted as a criterion for the pile operating capacity. The pile reliability analysis is based on the statistical information obtained during the preliminary pile testing with measuring the friction on the surface of the pile placed in the soil layers and the soil stress under the pile foot. The testing methods for obtaining the statistical information were well-known

and used earlier to generate the lists of  $f$ -values and  $R$ -values in the Set of Rules 24.13330.2011. Each random parameter is measured at least three times.

**Results.** The theory of analysis of the preliminary pile reliability in accordance with GOST 27751-2014 "Reliability of building structures and foundations" has been built on this statistical information. Reliability as the calculation result is represented by interval notation. The mathematical model of the limit state of the pile from the foundation soil bearing capacity has been borrowed from the Set of Rules. The connection (formula) between the length of the pile and the value of its reliability as a safety measure for its operation in the foundation soil has been established. Evaluation of the friction pile reliability corresponding to the characteristic value is carried out by calculation (trial-and-error method) from the mechanical properties of the soil and the load on the pile with the indication of the value of the length of the pile or the sum of the soil layers, each of the values in this case shall be not more than 2 m. The reliability analysis is described in the case studies set out in the article.

**Conclusions.** Pile reliability analysis is based on the actual information about the pile operation in the foundation soil according to the current regulations of the Russian Federation, so the proposed method of the friction pile reliability analysis can be transferred into practice. It can also be used in the reliability calculation for other load-bearing elements, in the regulatory literature, and in the academic work of construction universities.

**KEYWORDS:** friction pile, soil bearing capacity, safety, reliability, failure possibility, pile length, characteristic reliability value, reliability analysis

**FOR CITATION:** Utkin V.S. Friction pile reliability analysis with respect to the foundation soil bearing capacity. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2018; 8(4):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

По Международному стандарту ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения», введенному с 01.03.2017 г., под термином «надежность» понимается свойство объекта (свай) сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения и технического обслуживания. Свая в свайном основании фундамента является несущим элементом всего здания и от ее надежности зависит надежность всей надфундаментной части здания или сооружения. Надежность отдельного несущего элемента и всей конструкции служит количественной мерой безопасности их эксплуатации. Надежность, как показатель безопасности эксплуатации конструкций, количественно характеризует резерв между несущей способностью элемента и фактическим значением воздействия на него. Существующие методы определения надежности несущих элементов, построенные на их анализе по внешним признакам при современном развитии науки, средств измерений и накопленного опыта в эксплуатации зданий и сооружений не могут быть рекомендованы для оценки уровня безопасности эксплуатации отдельных несущих элементов и тем более зданий и сооружений в целом. В связи с этим предлагается рассмотреть научный подход в расчетах надежности висячих свай в основаниях фундаментов.

Свай в существующих основаниях в большинстве случаев недоступны для их испытаний и оценки остаточной несущей способности, мерой которой служит наибольшее значение нагрузки, не приводящей сваю в запредельное состояние по первой и второй группам предельных состояний, в соответ-

ствии с нормами СП 24.13330.2011 «Свайные основания» (в дальнейшем — СП). В связи с этим будет рассмотрен метод расчета надежности железобетонной висячей сваи по результатам испытаний одной или нескольких пробных свай на стадии проектирования, погружаемых в грунт на участке будущего основания фундамента, и на стадии эксплуатации вблизи объекта обследования. В работах [1, 2] была рассмотрена методика расчета железобетонных свай по критерию прочности материала висячих свай и свай-стоек. Метод расчета надежности свай-стоек при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах в расчетной математической модели по несущей способности грунта основания был рассмотрен в статье [3]. В данной работе будет рассмотрена проблема расчета надежности свай по критерию несущей способности грунта основания по расчетной схеме работы сваи, принятой нормативным документом СП 24.13330.2011 и изображенной на рис. 1. Хотя принятый в СП подход к описанию работы сваи в грунте основания предлагается заменить другим [1, 4], на основе распределения деформаций материала сваи, он еще не вошел в нормативную литературу, в то время как Межгосударственный стандарт ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» требует оценивать безопасность эксплуатации несущих элементов, в том числе свай, мерой надежности, что свидетельствует о своевременности и актуальности предлагаемой проблемы в статье. Общие вопросы теории надежности и методы расчетов надежности несущих элементов описаны в публикациях [5–7].

В труде [8] рассмотрен метод расчета несущей способности и надежности висячих свай по крите-

рию прочности материала сваи и грунта основания. Расчет надежности сваи по несущей способности грунта [8] построен на вероятностно-возможностном методе, в котором контролируемые параметры в расчетной модели описываются вероятностно-возможностными методами.

Расчет надежности свайных фундаментов, предусмотренный в китайских строительных нормах, проводится вероятностно-статистическими методами [9], требующими полной статистической информации о контролируемых параметрах в математических моделях предельных состояний. Вероятностно-статистический метод, построенный на основе метода Монте-Карло, рассмотрен в работе [10].

При ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах в математических моделях предельных состояний в расчетах надежности свай использован возможностный метод с треугольными функциями распределения нечетких переменных [11]. Треугольные функции распределения являются приближенными, и их применение требует обоснования. В публикации [12] для выявления индекса надежности висячих свай рассмотрено планирование эксперимента с использованием поверхности отклика.

Оценка надежности строительных конструкций при неполной статистической информации производится методами на основе теории размытых или нечетких множеств [13].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Несущая способность сваи по несущей способности грунта основания по СП определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_c \left( \gamma_{c,R} RA + u \sum_{i=1}^n \gamma_{c,f} f_i h_i \right), \quad (1)$$

где  $u$  — периметр поперечного сечения сваи;  $h_i$  — высота слоя грунта основания при  $h_i \leq 2$  м.

Другие значения параметров формулы (1) можно найти в СП.

Надежность висячей сваи по несущей способности грунта основания определяется по математической модели предельного состояния:

$$N \leq \tilde{F}_d, \quad (2)$$

где  $N$  — фактическая расчетная нагрузка, передаваемая на сваю.

Волнистые линии над буквами обозначают, что они являются случайными величинами, как принято в теориях надежности [5, 6], которые принимают различные значения при их измерениях (определениях).

Ниже рассматривается метод расчета надежности висячей сваи по несущей способности грунта многослойного основания. На практике такой вариант основания фундамента наиболее распро-

страненный. Значение расчетного сопротивления  $R$  грунта основания в СП определяется по результатам определения нормативного сопротивления  $R^u$  грунта, а последнее — по результатам измерений объемного веса грунта, удельного сцепления грунта и ряда коэффициентов. Следовательно, первый член в правой части уравнения (1) будет случайной величиной. Силы трения-сцепления  $f_i$  также будут случайными величинами, так как находятся по результатам их измерений, например по способу [14]. В расчетах надежности коэффициенты условий работы, принятые в (1) по СП, не используются. Параметры  $A$ ,  $u$  и  $h_i$  малоизменчивы и их можно принять детерминированными величинами. Тогда из (1) имеем следующее выражение для предельной нагрузки по несущей способности грунта основания:

$$\tilde{F}_d = \tilde{R}A + u \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i h_i. \quad (3)$$

Нагрузку на сваю  $N$  на стадии эксплуатации можно определить многократными измерениями на существующих сваях, например таким методом [15]. На стадии проектирования  $N$  можно определить по результатам измерений  $N_i$  в подобных конструкциях или другими методами.

Математическая модель предельного состояния (2) примет вид:

$$\tilde{N} \leq \tilde{R}A + u \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i h_i. \quad (4)$$

Расчет надежности сваи упрощается, если принять  $N$  в качестве расчетной (детерминированной) величины, что будет отмечено ниже.

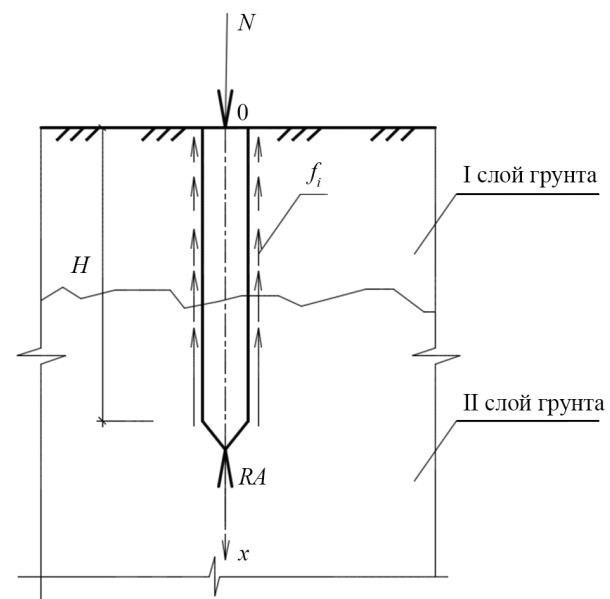


Рис. 1. Расчетная схема работы висячей сваи в грунте основания по СП 24.13330.2011

По Межгосударственному стандарту ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» расчет надежности рекомендовано проводить вероятностно-статистическим методом, если достаточна по объему статистическая информация о параметрах в расчетных моделях.

На практике число результатов измерений контролируемых параметров в формуле (4), как правило, мало и, следовательно, вероятностные методы расчетов надежности не применимы. В таких случаях можно использовать возможностный метод [16–20], в котором случайные величины называются нечеткими переменными. Нечеткие переменные, например  $X$ , характеризуются функциями распределения  $\pi_X(x)$  различного вида. На практике расчетов надежности часто [1–3] используется функция распределения вида:

$$\pi_X(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $a_x = 0,5(X_{\max} + X_{\min})$ ;

$$b_x = 0,5 \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}, \quad \alpha \in [0,1].$$

Значением  $\alpha$  задаются согласно данным [21].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В обсуждении проблемы о расчете надежности ограничимся в статье тремя слоями грунта толщиной  $h_i \leq 2$  м каждый, как требуется по СП. Сгруппируем нечеткие переменные в формуле (4) близкие по физической природе.

В этом случае (4) представим в виде:

$$\tilde{N} - \tilde{R}A \leq u\tilde{f}_1h_1 + u\tilde{f}_2h_2 + u\tilde{f}_3h_3. \quad (6)$$

Все члены в (6) — нечеткие переменные.

Введем обозначения:  $\tilde{N} = X$ ,  $\tilde{R}A = Y$ ,  $u\tilde{f}_1h_1 = Z_1$ ,  $u\tilde{f}_2h_2 = Z_2$ ,  $u\tilde{f}_3h_3 = Z_3$  и с учетом этого запишем (6) в виде

$$X - Y \leq Z_1 + Z_2 + Z_3. \quad (7)$$

Правая часть (7) представляет сумму трех нечетких переменных, которая по работе [16] будет описываться одной нечеткой переменной  $Z$ , с параметрами  $Z_{\min}$  из всех  $Z_i$  и  $Z_{\max}$ . Соответственно для  $Z$  имеем  $a_z = 0,5(Z_{\max} + Z_{\min})$ ,  $b_z = 0,5 \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$ , где  $\alpha$  — уровень среза,  $\alpha \in [0,1]$ . Левая часть (7) представляет разность двух нечетких переменных, в которой для свай  $X > Y$ . Разность нечетких переменных в формуле (7) заменяется по правилам вычитания [16] одной с  $T_{\min} = X_{\min} - Y_{\max}$  и  $T_{\max} = X_{\max} - Y_{\min}$ . Тогда  $a_t = 0,5(T_{\max} + T_{\min})$ ,  $b_t = 0,5 \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$ .

Если  $N$  принять расчетной (детерминированной), то расчет упростится, так как левая часть (7)

будет содержать одну нечеткую величину  $Y$ , и  $(X - Y)$  можно обозначить через  $T$  и рассматривать как разность между детерминированной и нечеткой величиной в виде  $T_{\max} = N - Y_{\min}$  и  $T_{\min} = N - Y_{\max}$ .

Условие (7) запишется в виде

$$T \leq Z. \quad (8)$$

Если в формуле (8) окажется  $a_t \leq a_z$ , то возможность безотказной работы свай будет равна единице ( $R = 1$ ). Возможность отказа  $Q$  при описании всех нечетких переменных в (8) функцией распределения вида (5) будет определяться по формуле  $Q = \pi_T(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$  или

$$Q = \pi_Z(z) = \exp \left[ - \left( \frac{z^* - a_z}{b_z} \right)^2 \right], \quad \text{как показано на}$$

рис. 2. Необходимость безотказной работы  $N = 1 - Q$  (см. рис. 2).

Для определения  $t^*$  или  $z^*$  абсциссы пересечения функций  $\pi_T(t)$  и  $\pi_Z(z)$  находим из их равенства  $\pi_T(t) = \pi_Z(z)$ , как показано на рис. 2, или из уравнения  $\left| \frac{z^* - a_z}{b_z} \right| = \left| \frac{t^* - a_t}{b_t} \right|$ , при  $t^* = z^*$  (рис. 2). Значение  $t^*$  или  $z^*$  находим из всех корней уравнения при выполнении условия  $a_t \leq t^* \leq a_z$  (рис. 2).

После определения  $t^*$  или  $z^*$  можно найти возможность отказа свай  $Q$ .  $Q = \exp \left[ - \left( \frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$  или  $Q = \exp \left[ - \left( \frac{z^* - a_z}{b_z} \right)^2 \right]$ . Значение необходимости

безотказной работы свай по несущей способности грунта основания находим из  $N = 1 - Q$  (рис. 2). Надежность висячих свай по несущей способности грунта основания будет характеризоваться интервалом  $[N; R]$ . Свай рассчитываются также по критерию прочности материала свай [1, 2] и по ее осадке. Расчет надежности по этим двум предельным состояниям приведен в работе [3]. Сваю можно рассматривать как условную последовательную механическую систему, в которой отказ по одному из условных элементов (прочности, осадки и несущей способности грунта основания) приводит к отказу всей системы (свай). Но это отдельный вопрос, который в данной статье не рассматривается.

Предлагается следующий алгоритм расчета надежности свай по несущей способности грунта основания. Задаются длиной свай  $H$  при известных значениях размеров поперечного сечения. По результатам испытаний грунтов и пробной свай в грунте основания измеряют значения высоты слоев грунта  $h$ . Делят их на слои  $h_i \leq 2$  м в соответствии с требованиями СП 24.13330.2011. На середине слоев грунта измеряют значения сил трения  $f_i$  на поверхности свай не менее трех раз существующими методами при «срыве» свай и не менее трех раз прочность



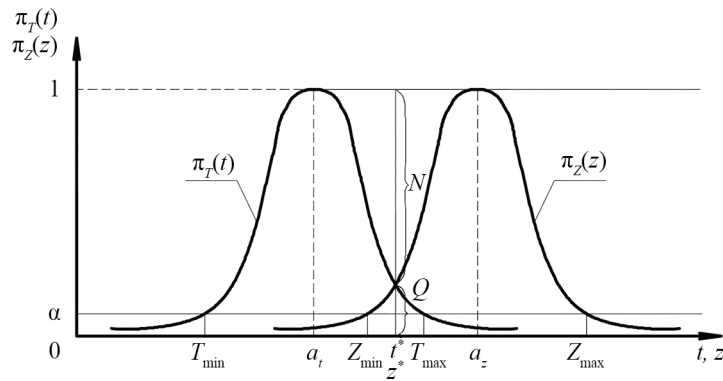


Рис. 2. Графическое представление решения условия  $T \leq Z$  по (8)

грунта  $R$  под нижним концом сваи при заданной длине сваи  $H$ . По этим значениям и нагрузке на сваю проводят расчет ее надежности по критерию несущей способности грунта.

Учитывая малую статистическую информацию о контролируемых параметрах, расчет надежности построен на основе теории возможностей. В результате расчета удастся подобрать длину сваи в грунте основания, отвечающей требованиям уровня надежности (безопасности эксплуатации). С учетом того, что метод расчета длины сваи по надежности построен на основе существующих нормативных документов, предложенная методика может найти применение в практике расчетов висячих свай по надежности.

Рассмотрим на примере расчет надежности железобетонной висячей сваи по критерию несущей способности грунта основания для глинистых грунтов с показателем текучести 0,4 при  $H = 6$  м, сечением  $30 \times 30$  см<sup>2</sup>.

Пусть известны  $u = 1,6$  м и результаты измерений в виде значений  $f_1 = \{17, 18, 19\}$  кПа,  $f_2 = \{24, 25, 26\}$  кПа,  $f_3 = \{28, 29, 30\}$  кПа, при  $h_i = 2$  м,  $\alpha = 0,01$ . С учетом обозначения  $uf_i(x)h_i = Z_i$ , будем иметь  $z_{1\max} = 45,6$  кН,  $z_{1\min} = 40,8$  кН,  $z_{2\max} = 62,4$  кН,  $z_{2\min} = 57,6$  кН,  $z_{3\max} = 72$  кН,  $z_{3\min} = 67,2$  кН. Из этих значений по формулам (6) и (7) находим по правилу сложения  $Z_{\max} = 180$  кН,  $Z_{\min} = 165,6$  кН. Отсюда по (5) имеем  $a_z = 172,8$  кН,  $b_z = 4,9$  кН. При  $A = 0,09$  м<sup>2</sup> и  $R = \{1800, 2000, 2100\}$  кПа при  $RA = Y = \{162, 180, 189\}$  кН имеем  $Y_{\max} = 189$  кН,  $Y_{\min} = 162$  кН. Пусть  $\tilde{N} = X = \{280, 330, 360\}$  кН, откуда  $X_{\max} = 360$  кН,  $X_{\min} = 280$  кН. Из  $Y$  и  $X$  формируем для (7) значения нечеткой переменной  $T = X - Y$ .

По правилам вычитания нечетких переменных [16] имеем  $T_{\max} = 360 - 162 = 198$  кН,  $T_{\min} = 280 - 189 = 91$  кН. Отсюда  $a_t = 144,5$  кН,  $b_t = 36,5$  кН. По полученным результатам формируем функции распределения  $\pi_T(t)$

$$\pi_T(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-144,5}{36,5}\right)^2\right],$$

$$\pi_Z(z) = \exp\left[-\left(\frac{z-172,8}{4,9}\right)^2\right].$$

Так как  $a_t = 144,5 \leq a_z = 172,8$  кН, то возможность безотказной работы  $R = 1$ .

$$\text{Из } \left|\frac{t^*-144,5}{36,5}\right| = \left|\frac{t^*-172,8}{4,9}\right| \text{ имеем } t^* = 169,4 \text{ кН,}$$

условие  $a_t \leq t^* \leq a_z$  или  $144,5 < 169,4 < 172,8$  выполняется. Возможность отказа сваи:

$$Q = \exp\left[-\left(\frac{t^*-144,5}{36,5}\right)^2\right] =$$

$$= \exp\left[-\left(\frac{169,4-144,5}{36,5}\right)^2\right] = e^{-0,467} = 0,627.$$

Необходимость безотказной работы  $N = 0,373$ .

Надежность сваи по критерию несущей способности грунта характеризуется интервалом  $[0,373; 1]$ . Надежность сваи мала. Задаемся большим значением длины висячей сваи  $H = 8$  м, и расчет сваи повторяется.

Рассмотрим второй пример с теми же исходными данными, но нагрузку на сваю уменьшаем и примем в виде следующих значений:  $\tilde{N} = X = \{240, 280, 320\}$  кН, при  $RA = Y = \{162, 180, 189\}$  кН.

Для  $N - RA$  или  $X - Y = T$  имеем  $T_{\max} = 320 - 162 = 158$  кН,  $T_{\min} = 240 - 189 = 51$  кН. Отсюда  $a_t = 104,5$  кН,  $b_t = 71,5$  кН. С учетом результатов решения в первом примере имеем уравнение  $\left|\frac{t^*-104,5}{71,5}\right| = \left|\frac{t^*-172,8}{4,9}\right|$ . Отсюда  $t^* = 168,4$  кН, ус-

ловие  $a_t \leq t^* \leq a_z$  выполняется.

Так как  $a_t = 104,5$  кН  $\leq a_z = 172,8$  кН, то  $R = 1$ .

$$Q = \exp \left[ \left( \frac{168,4 - 104,5}{71,5} \right)^2 \right] =$$

$$= e^{-0,795} = 0,00035,$$

$$N = 0,99965.$$

Надежность сваи возросла и характеризуется интервалом [0,99965; 1]. Если такая надежность сваи излишне большая, то длину сваи уменьшают. Нормативное значение надежности на сваю зависит от ответственности конструкции по безопасности. Этот вопрос находится в стадии изучения. Рассмотрим пример, в котором  $N = 280$  кН и является детерминированной (расчетной). В этом случае  $T_{\max} = 280 - 162 = 118$  кН,  $T_{\min} = 280 - 189 = 91$  кН. Дальнейшее решение аналогично приведенному в примере.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчета надежности (безопасности эксплуатации) висячих свай на основе

статистической информации о контролируемых параметрах математической модели предельного состояния (несущей способности грунта основания).

2. Расчет надежности свай построен на основе теории возможностей из-за ограниченности статистической информации о контролируемых параметрах, и результат расчета представляется в интервальном виде, в отличие от вероятностного метода расчета, который не применим для свай из-за малой информации о случайных величинах.

3. В результате расчета надежности свай удается подобрать эффективную длину сваи с заданными размерами поперечного сечения, отвечающей заданному значению надежности сваи при минимальных расходах материала на нее и на производство работ по изготовлению и погружению свай в грунт основания.

4. Материал статьи поможет в дальнейшем перейти к расчету надежности свай при других способах описания ее работы в грунте основания, а также при разработке методов расчета надежности свай по другим критериям ее безотказной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уткин В.С. Расчет надежности висячих железобетонных свай в грунте основания // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 1 (276). С. 31–36.
2. Utkin V., Sushev L. The reliability analysis of existing reinforced concrete piles in permafrost regions // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 2. Pp. 64–72. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-2-64-72
3. Уткин В.С. Расчет надежности железобетонных свай-стоек в основаниях фундаментов // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 3 (29). С. 24–34. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.2
4. Уткин В.С. Работа висячих свай в грунте основания и их расчет по осадке // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 9. С. 1125–1132. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1125-1132
5. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М. : АСВ, 1998. 304 с.
6. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.
7. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
8. Иванова Т.В., Альберт И.У., Кауфман Б.Д., Шульман С.Г. Несущая способность висячих свай по критерию прочности материала сваи или грунта // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 7. С. 3–12. DOI: 10.5862/МСЕ.67.1
9. Li J.P., Zhang J., Lui S.N., Juang C.H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55. Pp. 637–649. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.04.014
10. Schmoor K.A., Achmus M., Foglia A., Wefer M. Reliability of design approaches for axially loaded offshore piles and its consequences with respect to the North Sea // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Issue 6. Pp. 1112–1121. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.06.004
11. Cao W., Zhang Y., Zhao M. Non-probabilistic fuzzy reliability analysis of pile foundation stability by interval theory // Journal of Central South University of Technology. 2007. Vol. 14. Issue 6. Pp. 864–869. DOI: 10.1007/s11771-007-0164-3
12. Pula W. Reliability of laterally loaded rigid piles // CISM Courses and Lectures book series. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. 2007. Vol. 491. Pp. 169–183. DOI: 10.1007/978-3-211-73366-0\_7
13. Мартынов С.В., Шупиков Е.А., Кривенко Е.И. Особенности оценки надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // Труды БрГУ. Сер. : Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 227–230.
14. Иванов А.А. Оценка несущей способности основания щелевых фундаментов на основе анализа напряженного состояния грунтового массива и

экспериментальных данных : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 23 с.

15. Пат. РФ 2582495, МПК G01L 1/18, G01N 3/08. Способ измерения и мониторинга давления на бетонные и кирпичные несущие стены и фундаменты зданий и сооружений на заданном уровне на стадии их эксплуатации / В.С. Уткин, Д.А. Тропина, Н.В. Горева; патентообл. Вологодский государственный университет. Заявл. № 2014150361/28 11.12.2014; опубл. 27.04.2016. Бюл. № 12.

16. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М. : Радио и связь, 1990. 288 с.

17. Уткин В.С., Борисова О.Л. Расчет надежности щелевого фундамента по критерию несущей способности грунта основания на стадии эксплуатации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 6 (57). С. 7–17.

18. Андрианова Е.А., Кауфман Б.Д. Вероятностная и возможностная оценки вибраций агрегатного блока ГЭС от пульсации воды в водобойном колодце // Гидротехническое строительство. 2014. № 5. С. 34–37.

19. Кауфман Б.Д. Оценка надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях в условиях неполноты исходной информации : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2015. 35 с.

20. Zaden L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy sets and systems. 1978. Vol. 1. Issue 1. Pp. 3–28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5

21. Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А. Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможностным методом // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6. С. 63–67.

Поступила в редакцию 8 октября 2018 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2018 г.

Одобрена для публикации 26 ноября 2018 г.

ОБ АВТОРЕ: **Уткин Владимир Сергеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, заслуженный работник высшей школы РФ, **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, utkinvogtu@mail.ru.

## INTRODUCTION

According to the International Standard GOST 27.002-2015 “Reliability in Engineering. Terms and Definitions” dated March 01, 2017, the term “reliability” means the property of an object (pile) to maintain in time the ability to perform the required functions in specified modes and conditions of use and maintenance. The pile in the pile foundation is the bearing element of the whole building and the reliability of the entire part of the building or structure which is above the foundation depends on its reliability. The reliability of a single bearing element and the entire structure is a quantitative measure of safety of their operation. Reliability, as an indicator of the structure safe operation, quantifies the reserve between the bearing capacity of the element and the actual value of the impact on it. Existing methods of determining the reliability of the bearing elements based on the visual analysis cannot be recommended for assessing the level of safety of the individual load-bearing elements operation and especially the entire facilities operation due to the current state of science, measuring instruments and experience gained in the facilities operation. In this regard, it is proposed to consider the scientific approach to the reliability analysis of the friction piles in the foundation bed.

Piles in the existing foundation beds in most cases are not available for testing and evaluating the residual bearing capacity the measure of which is the highest load value that does not lead the pile to the state beyond the limit one from the first and second groups of limit states, in accordance with Set of Rules 24.13330.2011 “Pile foundations” (hereinafter — Set of Rules). Within this context, a method of reliability analysis of the reinforced-concrete friction pile based on the results of the design stage tests of one or more preliminary piles embedded into the soil at the site of the future foundation bed and the tests performed at the stage of operation near the object of the inspection will be considered. In studies [1, 2], methods of the reliability analysis of reinforced-concrete piles with respect to the friction pile and end-bearing pile material strength are considered. The method of the reliability analysis of end-bearing piles with limited statistical information about the monitored parameters in the design mathematical model from the foundation soil bearing capacity is considered in the article [3]. In this study the problem of friction pile reliability analysis with respect to the foundation soil bearing capacity according to the design pile operation scheme adopted by the regulatory document Set of Rules 24.13330.2011 and shown in Fig. 1. Although the approach to the description of the pile operation in

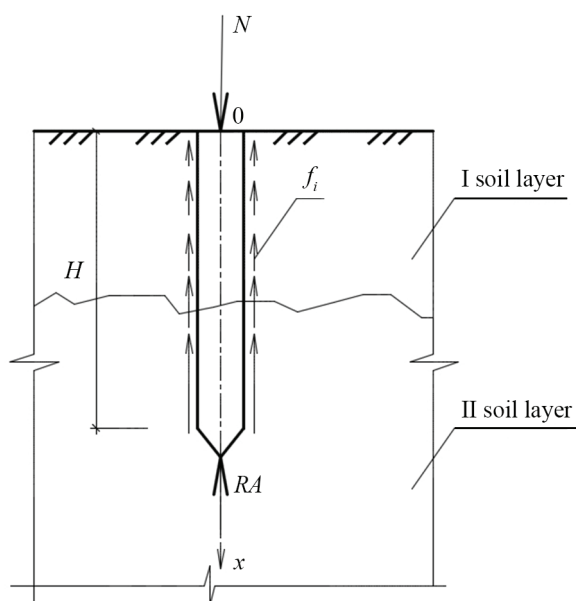


Fig. 1. The design friction pile operation scheme in the foundation soil according to the Set of Rules 24.13330.2011

the foundation soil adopted in the Set of Rules is proposed to be replaced by another one [1, 4], based on the distribution of the pile material deformation, it has not yet been specified in the regulatory literature, while the Interstate Standard GOST 27751-2014 “Reliability of building structures and foundations” requires assessment of the safety of the bearing elements operation, including piles, on the basis of the measure of reliability, which indicates the timeliness and relevance of the proposed problem in the article. General issues of the reliability theory and methods of load-bearing elements reliability analysis are described in the publications [5–7].

In the study [8], method of the friction pile bearing capacity and reliability analysis with respect to the pile material and soil foundation strength is considered. Pile reliability analysis from the soil bearing capacity [8] is based on the probabilistic and possibilistic method in which the monitored parameters in the design model are described by probabilistic and possibilistic methods.

Pile foundation reliability analysis provided in the Chinese building codes is carried out by probabilistic and statistical methods [9] requiring complete statistical information about the monitored parameters in mathematical models of limit states. The probabilistic and statistical method based on the Monte Carlo method is considered in the study [10].

With limited statistical information on the monitored parameters, the possibilistic method with triangular functions of fuzzy variables distribution [11] is used in the mathematical models of limit states in the pile reliability analyses. Triangular distribution functions are approximate and their application requires justification. In the publication [12], to identify the reliability index

of friction piles, the experiment design with the use of the response surface is considered.

Evaluation of the reliability of building structures with incomplete statistical information is carried out by methods based on the theory of fuzzy sets [13].

## MATERIALS AND METHODS

The pile bearing capacity from the soil foundation bearing capacity according to the Set of Rules is determined by the formula:

$$F_d = \gamma_c \left( \gamma_{c,R} RA + u \sum_{i=1}^n \gamma_{c,f} f_i h_i \right), \quad (1)$$

where  $u$  is the cross-sectional perimeter of the pile;  $h_i$  is the height of the foundation soil layer at  $h_i \leq 2$  m.

Other values of formula (1) parameters can be found in the Set of Rules.

Friction pile reliability from the foundation soil bearing capacity is determined by the mathematical model of the limit state:

$$N \leq \tilde{F}_d, \quad (2)$$

where  $N$  is the actual design load transferred to the pile.

Wavy lines above the letters indicate that they are random variables, as is customary in the reliability theories [5, 6], which take different values in their measurement (estimation).

A method of calculating the friction pile reliability from the foundation soil bearing capacity is considered below. In practice, this type of foundation bed is the most common. The value of the foundation soil design resistance  $R$  in the Set of Rules is determined on the basis of the value of the soil characteristic resistance  $R^H$ , and the value of the  $R^H$  — according to the results of measurement of the soil bulk density, the soil specific cohesion, and a number of factors. Therefore, the first term on the right side of equation (1) will be a random variable. Friction and traction  $f_i$  will also be random variables since their values are based on the results of their measurements, for example, by this method [14]. In the calculation of reliability, condition load effect factors adopted in (1) according to the Set of Rules are not used. The parameters  $A$ ,  $u$  and  $h_i$  vary only slightly and they can be considered non-probabilistic variables. Then from (1) we have the following expression for the limit load from the soil foundation bearing capacity:

$$\tilde{F}_d = \tilde{R}A + u \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i h_i. \quad (3)$$

The load on the pile  $N$  at the stage of operation can be determined by multiple measurements of existing piles, for example, by this method [15]. At the design stage,  $N$  can be determined from measurements of  $N_i$  in similar structures or by other methods.

The mathematical model of the limit state (2) will be as follows:



$$\tilde{N} \leq \tilde{R}A + u \sum_{i=1}^n \tilde{f}_i h_i. \quad (4)$$

Pile reliability calculation is simplified if we take  $N$  as the design (non-probabilistic) variable which will be noted below.

According to the Interstate Standard GOST 27751-2014 “Reliability of building structures and foundations”, reliability analysis is recommended to carry out by probabilistic and statistical method, if the statistical information about the parameters in the design models is sufficient.

In practice, the number of measurements of the monitored parameters in formula (4) is normally small and, therefore, probabilistic methods of reliability analysis are not applicable. In such cases it is possible to use the possibilistic method [16–20] where random variables are called fuzzy variables. Fuzzy variables, such as  $X$ , are determined by distribution functions  $\pi_x(x)$  of various types. In practice, the following distribution function is often [1–3] used in the reliability analysis:

$$\pi_x(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

where  $a_x = 0.5(X_{\max} + X_{\min})$ ,

$$b_x = 0.5 \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}, \quad \alpha \in [0.1].$$

The  $\alpha$  value is set according to the data [21].

## RESEARCH RESULTS

Consideration of the problem of reliability analysis in the article is limited to three layers of soil, thickness  $h_i \leq 2$  m each, as required by the Set of Rules. We group fuzzy variables similar in physical nature in formula (4).

In this case (4) will be as follows:

$$\tilde{N} - \tilde{R}A \leq u\tilde{f}_1 h_1 + u\tilde{f}_2 h_2 + u\tilde{f}_3 h_3. \quad (6)$$

All terms in (6) are fuzzy variables.

We introduce the notations:  $\tilde{N} = X$ ,  $\tilde{R}A = Y$ ,  $u\tilde{f}_1 h_1 = Z_1$ ,  $u\tilde{f}_2 h_2 = Z_2$ ,  $u\tilde{f}_3 h_3 = Z_3$  and, accordingly, (6) will be as follows:

$$X - Y \leq Z_1 + Z_2 + Z_3. \quad (7)$$

The right part (7), the sum of three fuzzy variables, will be described in the study [16] by one fuzzy variable  $Z$ , with  $Z_{\min}$  parameters from all  $Z_i$  and  $Z_{\max}$ . Accordingly, for  $Z$  we have  $a_z = 0.5(Z_{\max} + Z_{\min})$ ,  $b_z = 0.5 \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$ , where  $\alpha$  — the cut off level,

$\alpha \in [0.1]$ . The left part (7) is the difference of two fuzzy variables in which  $X > Y$  in relation to the pile. The difference between fuzzy variables in formula (7) shall be replaced according to the subtraction rules [16] by one variable with  $T_{\min} = X_{\min} - Y_{\max}$  and  $T_{\max} = X_{\max} - Y_{\min}$ .

$$\text{Then } a_t = 0.5(T_{\max} + T_{\min}), \quad b_t = 0.5 \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}.$$

If  $N$  is assumed to be the design (non-probabilistic) variable, then the calculation will be simplified, since the left part (7) will contain one fuzzy variable  $Y$ , and  $(X - Y)$  can be denoted by  $T$  and considered as the difference between the non-probabilistic and fuzzy variables in the form of  $T_{\max} = N - Y_{\min}$  and  $T_{\min} = N - Y_{\max}$ .

Condition (7) we can write as:

$$T \leq Z. \quad (8)$$

If in the formula (8)  $a_t \leq a_z$ , the possibility of failure-free operation of the pile will be equal to one ( $R = 1$ ). The failure possibility  $Q$  in the description of all fuzzy variables in (8) by the distribution function of type (5) will be determined

by the formula  $Q = \pi_t(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$  or

$$Q = \pi_z(z) = \exp \left[ - \left( \frac{z^* - a_z}{b_z} \right)^2 \right]$$
 as shown in Fig. 2. The

need for failure-free operation  $N = 1 - Q$  (see Fig. 2).

To determine the  $t^*$  or  $z^*$ , we find abscissas of the intersection of functions  $\pi_t(t)$  and  $\pi_z(z)$  from their equality  $\pi_t(t) = \pi_z(z)$ , as shown in Fig. 2, or from the

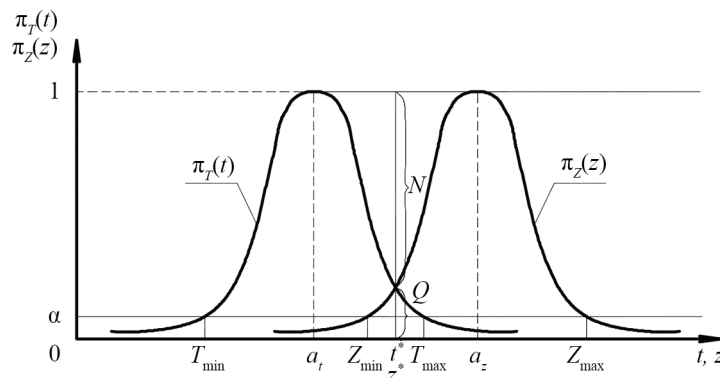


Fig. 2. Graphical representation of the solution of the condition  $T \leq Z$  according to (8)

equation  $\left| \frac{z^* - a_z}{b_z} \right| = \left| \frac{t^* - a_t}{b_t} \right|$ , where  $t^* = z^*$  (Fig. 2).

The value  $t^*$  or  $z^*$  we find from all the roots of the equation under the condition  $a_t \leq t^* \leq a_z$  (Fig. 2).

After the determination of  $t^*$  or  $z^*$ , the possibility of the pile failure  $Q$  can be found.  $Q = \exp \left[ - \left( \frac{t^* - a_t}{b_t} \right)^2 \right]$  or  $Q = \exp \left[ - \left( \frac{z^* - a_z}{b_z} \right)^2 \right]$ . The value of the need for the

pile failure-free operation from the soil foundation bearing capacity are determined from the  $N = 1 - Q$  (Fig. 2). Friction pile reliability from the soil foundation bearing capacity will be determined by the interval  $[N; R]$ . Pile reliability is also calculated according to the pile material strength criterion [1, 2] and the pile load-deformation behaviour. The pile reliability analysis from these two limit states is given in the study [3]. The pile can be considered as a conditional sequential mechanical system in which the failure of one of the hypothetical elements (strength, load deformation, and foundation soil bearing capacity) leads to the failure of the entire system (pile). But this is a separate problem which is not considered in this article.

The following pile reliability analysis from the soil foundation bearing capacity is proposed. The length of the pile  $H$  is set under certain values of the cross-sectional dimensions. According to the results of soil and preliminary pile testing in the foundation soil, the values of the soil layers height  $h$  are measured. Then they are divided into layers  $h_i \leq 2$  m in accordance with the requirements of Set of Rules 24.13330.2011. In the middle of the soil layers, the values of the friction  $f_i$  on the surface of the pile are measured by existing methods for pile failure at least three times and the soil strength  $R$  under the pile foot at a given length of the pile  $H$  — at least three times. According to these values and the load on the pile, the calculation of the pile reliability is carried out with the usage of the soil bearing capacity criterion.

The reliability analysis is based on the possibility theory in consideration of the lack of statistical information about the monitored parameters. As a result of the analysis, it is possible to choose the length of the pile in the foundation soil that meets the requirements of the reliability (operational safety) level. Due to the fact that the method of calculating the pile length from reliability is based on existing regulations, the proposed method can be used in the practice of calculations of the pile length from reliability.

Let's consider the example of the calculating the reinforced-concrete friction pile reliability from the criterion of the foundation soil bearing capacity for clay soils with a liquidity index 0.4 at  $H = 6$  m and a cross section of  $30 \times 30$  cm<sup>2</sup>.

Let  $u$  be 1.6 m and the measurement results be as follows:  $f_1 = \{17, 18, 19\}$  kPa,  $f_2 = \{24, 25, 26\}$  kPa,  $f_3 = \{28, 29, 30\}$  kPa, at  $h_i = 2$  m,  $\alpha = 0.01$ . In consideration of  $uf_i(x)h_i = Z_i$ , we have  $z_{1\max} = 45.6$  kN,  $z_{1\min} = 40.8$  kN,  $z_{2\max} = 62.4$  kN,  $z_{2\min} = 57.6$  kN,  $z_{3\max} = 72$  kN,  $z_{3\min} = 67.2$  kN. With these values, according to the formulas (6) and (7) we can find  $Z_{\max} = 180$  kN,  $Z_{\min} = 165.6$  kN. According to (5) we have  $a_z = 172.8$  kN,  $b_z = 4.9$  kN. At  $A = 0.09$  m<sup>2</sup> and  $R = \{1800, 2000, 2100\}$  kPa at  $RA = Y = \{162, 180, 189\}$  kN we have  $Y_{\max} = 189$  kN,  $Y_{\min} = 162$  kN. Let  $\tilde{N} = X = \{280, 330, 360\}$  kN, whence it follows that  $X_{\max} = 360$  kN,  $X_{\min} = 280$  kN. Based on  $Y$  and  $X$  we form for (7) the values of the fuzzy variable  $T = X - Y$ .

According to the rules of fuzzy variables subtraction [16], we have  $T_{\max} = 360 - 162 = 198$  kN,  $T_{\min} = 280 - 189 = 91$  kN. Whence it follows that  $a_t = 144.5$  kN,  $b_t = 36.5$  kN. According to the results, we form the distribution functions  $\pi_T(t)$  and

$$\pi_z(z) \text{ as follows: } \pi_T(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - 144.5}{36.5} \right)^2 \right],$$

$$\pi_z(z) = \exp \left[ - \left( \frac{z - 172.8}{4.9} \right)^2 \right].$$

Since  $a_t = 144.5 \leq a_z = 172.8$  kN, the failure-free operation possibility  $R = 1$ .

According to  $\left| \frac{t^* - 144.5}{36.5} \right| = \left| \frac{t^* - 172.8}{4.9} \right|$ , we have  $t^* = 169.4$  kN, the condition  $a_t \leq t^* \leq a_z$  or  $144.5 < 169.4 < 172.8$  is satisfied. Possibility of the pile failure:

$$Q = \exp \left[ - \left( \frac{t^* - 144.5}{36.5} \right)^2 \right] = \exp \left[ - \left( \frac{169.4 - 144.5}{36.5} \right)^2 \right] = e^{-0.467} = 0.627.$$

The need for failure-free operation  $N = 0.373$ .

The pile reliability from the criterion of soil bearing capacity is determined by the interval  $[0.373; 1]$ . The pile reliability is small. We set a larger value of the length of the friction pile  $H = 8$  m, and the calculation of the pile reliability is repeated.

Let's consider the second example with the same basic data, but reduce the load on the pile and take the following values:  $\tilde{N} = X = \{240, 280, 320\}$  kN, at  $RA = Y = \{162, 180, 189\}$  kN.

For  $N - RA$  or  $X - Y = T$  we have  $T_{\max} = 320 - 162 = 158$  kN,  $T_{\min} = 240 - 189 = 51$  kN. Whence it follows that  $a_t = 104.5$  kN,  $b_t = 71.5$  kN. In consideration of the results of the solution in the first example, we have the equation  $\left| \frac{t^* - 104.5}{71.5} \right| = \left| \frac{t^* - 172.8}{4.9} \right|$ . Whence it follows that  $t^* = 168.4$  kN, the condition  $a_t \leq t^* \leq a_z$  is satisfied.

Since  $a_t = 104.5$  kN  $\leq a_z = 172.8$  kN, then  $R = 1$ .

$$Q = \exp \left[ \left( \frac{168.4 - 104.5}{71.5} \right)^2 \right] = e^{-0.795} = 0.00035,$$

$$N = 0.99965.$$

Reliability of the pile has increased and is determined by the interval [0.99965; 1]. If such reliability of the pile is too large, the length of the pile is reduced. The characteristic reliability value of the pile depends on the construction importance class. This issue is under study. Let's consider an example in which  $N = 280$  kN is a design (non-probabilistic) variable. In this case,  $T_{\max} = 280 - 162 = 118$  kN,  $T_{\min} = 280 - 189 = 91$  kN. The further solution is similar to the given one in the example.

## CONCLUSIONS

1. The method of the friction pile reliability (operational safety) analysis on the basis of the statistical

information on the monitored parameters of the limit state (foundation soil bearing capacity) mathematical model has been developed.

2. The pile reliability analysis is based on the possibility theory due to the limited statistical information on the monitored parameters, and the calculation result is represented by interval notation, in contrast to the probabilistic analysis which is not applicable for piles because of the lack of information about random variables.

3. As a result of the pile reliability analysis, it is possible to find the effective length of the pile with the specified cross-sectional size that corresponds to the given value of the pile reliability with minimal material usage related to the pile and the works on pile manufacturing and embedding in the foundation soil.

4. The material of the article will help in the future to carry out the pile reliability analysis with other ways of describing its operation in the foundation soil, as well as in the development of methods for the pile reliability analysis according to other criteria of its failure-free operation.

## REFERENCES

1. Utkin V.S. Reliability analysis of reinforced concrete friction piles in soil base. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2018; 1(276):31-36. (rus.).
2. Utkin V.S., Sushev L.A. The reliability analysis of existing reinforced concrete piles in permafrost regions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 2:64-72. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-2-64-72
3. Utkin V.S. Calculation of reliability of ferro-concrete rack-piles in the basis of foundations. *Construction Science and Education*. 2018; 8(3):24-34. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.2 (rus.).
4. Utkin V.S. Friction piles behavior in soil base and piles settlement calculation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 9:1125-1132. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1125-1132 (rus.).
5. Rayzer V.D. *Reliability theory in structural design*. Moscow, ASV Publ., 1998; 304. (rus.).
6. Rzhantsyn A.R. *Theory of structure design on reliability*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 239. (rus.).
7. Shpete T. Reliability of bearing structures. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994; 288. (rus.).
8. Ivanova T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., Shulman S.G. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 7:3-12. DOI: 10.5862/MCE.67.1 (rus.).
9. Li J.P., Zhang J., Lui S.N., Juang C.H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai China. *Soils and Foundations*. 2015; 55:637-649. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.04.014
10. Schmoor K.A., Achmus M., Foglia A., Wefter M. Reliability of design approaches for axially loaded offshore piles and its consequences with respect to the North Sea. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018; 10(6):1112-1121. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.06.004
11. Cao W., Zhang Y., Zhao M. Non-probabilistic fuzzy reliability analysis of pile foundation stability by interval theory. *Journal of Central South University of Technology*. 2007; 14:864-869. DOI: 10.1007/s11771-007-0164-3
12. Pula W. Reliability of laterally loaded rigid piles. *CISM Courses and Lectures book series. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. 2007; 491:169-183. DOI: 10.1007/978-3-211-73366-0\_7
13. Martynov S.V., Shupikov E.A., Krivenko E.I. Features of an estimation of reliability of building structures under incomplete information. *Proceedings of the Bratsk State University. Ser. : Natural and Engineering sciences*. 2015; 1:227-230. (rus.).
14. Ivanov A.A. Assessment of the bearing capacity of the base of slotted foundations based on the analysis of the stress state of the soil mass and experimental data. *Thesis of candidate of technical science*. Volgograd, 2013; 23. (rus.).
15. Pat. Russian Federation 2582495, МПК G01L 1/18, G01N 3/08. *Method of measuring and monitoring pressure on concrete and brick bearing walls and foundations of buildings and structures at a given level*

at the stage of their operation / V.S. Utkin, D.A. Tropina, N.V. Goreva; patentee of Vologda State University. Appl. No. 2014150361/28 11.12.2014. Bul. No. 12. (rus.).

16. Dyubua D., Prad A. *Possibility theory. Applications to knowledge representation in computer science*. Moscow, Radio and communication Publ., 1990; 288. (rus.).

17. Utkin V.S., Borisova O.L. Calculation of the reliability of the slit foundation by the criterion of the bearing capacity of the foundation soil at the stage of operation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 6(57):7-17. (rus.).

18. Andrianova E.A., Kaufman B.D. Probabilistic and possibilistic assessment of vibration of the unit of the hydroelectric power station from the pulsation of

water in the water well. *Power Technology and Engineering*. 2014; 5:34-37. (rus.).

19. Kaufman B.D. Estimation of reliability of hydraulic engineering structures at dynamic influences in the conditions of incompleteness of initial information. *Thesis of doctor of technical science*. Saint-Petersburg, 2015; 35. (rus.).

20. Zaden L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. 1978; 1(1):3-28. DOI: 10.1016/0165-0114(78)90029-5

21. Utkin V.S., Solov'yev S.A., Kaberova A.A. The value of the cutoff level (risk) in the calculation of reliability of bearing elements by possibilistic method. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2015; 6:63-67. (rus.).

Received October 8, 2018

Adopted in a modified form October 28, 2018

Approved for publication November 26, 2018

ABOUT THE AUTHOR: **Vladimir S. Utkin** — Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Industrial and Civil Engineering, the honored worker of the higher school of the Russian Federation, **Vologda State University (VSU)**, 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation, utkinvogtu@mail.ru.