

УДК 624.131:624.046

## РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТОВ РАСПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

канд. техн. наук, доц. А.П. КРЕМНЁВ;  
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ; Н.Н. ВИШНЯКОВ; Т.М. ГЛУХОВА  
(Полоцкий государственный университет)

Анализируется проблема расчета несущей способности фундаментов распорных сооружений. Рассмотрены возможные варианты их расчета. Предложена реализация алгоритма расчета коэффициента запаса устойчивости фундамента на ЭВМ с использованием объектно-ассоциативной системы, разработанной в Полоцком государственном университете. Представлен расчет фундамента распорного сооружения с помощью данной программы. Рассмотрена возможность учета анизотропии прочностных свойств грунтов в расчетах устойчивости фундаментов. Представлен сравнительный расчет устойчивости фундамента с учетом и без учета анизотропии прочностных свойств грунтов. Сделаны выводы о возможности использования программы при расчете фундаментов распорных сооружений с учетом анизотропии прочностных свойств грунтов.

**Ключевые слова:** фундаменты распорных сооружений, алгоритм расчета несущей способности, анизотропия прочностных свойств грунтов.

Согласно Техническому кодексу ТКП 45-5.01-67-2007 все фундаменты, на которые действуют значительные горизонтальные нагрузки, должны в обязательном порядке рассчитываться по первой группе предельных состояний. Аналогичные требования содержатся и в ТКП EN 1997-1-2009. Значительные горизонтальные нагрузки на фундамент передаются, как правило, от вышележащих распорных конструкций. Классическим примером таких сооружений являются здания животноводческого комплекса с применением железобетонных или стальных полурам, работающих по схеме трехшарнирных арок. В таких конструкциях величина горизонтального распора составляет практически 70% от значения вертикальной нагрузки.

Как показывает практика проектирования, расчет по несущей способности (устойчивости) фундаментов таких сооружений выполняется по упрощенной методике, не учитывающей существенные особенности грунтового основания, такие как неоднородность и анизотропия прочностных свойств.



Рисунок 1. – Распорное сооружение, состоящее из полурам

Расчет оснований по несущей способности (прочности, устойчивости) в общем случае согласно ТКП 45-5.01-67-2007 производится из условия

$$F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot \Phi_u, \quad (1)$$

где  $F$  – внешняя расчетная нагрузка на основание в наиболее невыгодной комбинации, кН;  $\Phi_u$  – наименьшая несущая способность основания из условия его предельного равновесия или прочности скального грунта по направлению нагрузки, кН;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения.

Для определения несущей способности основания в частных случаях (когда грунт находится в стабилизированном состоянии, однороден на глубину не менее ширины фундамента и т.п.) возможно применение аналитического метода. Наиболее широко известны следующие методы [1]:

- аналитический метод расчета на глубокий сдвиг фундаментов с горизонтальной подошвой при действии внецентренной наклонной нагрузки;
- аналитический метод расчета на глубокий сдвиг фундаментов с наклонной подошвой при действии внецентренной наклонной нагрузки;
- аналитический метод расчета несущей способности двухслойного основания.

Кроме этого, также необходимо отметить, что применение аналитических методов ограничено следующим условием:

$$\operatorname{tg} \delta \leq \sin \varphi_1, \quad (2)$$

где  $\delta$  – угол наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание, град;  $\varphi_1$  – угол внутреннего трения грунта, град.

При невыполнении условия (2) проверку несущей способности нескального основания фундамента следует производить исходя из следующих возможных вариантов потери устойчивости (в зависимости от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющих равнодействующей нагрузки, а также от величины эксцентриситета):

- плоский сдвиг по подошве фундамента;
- глубинный сдвиг;
- смешанный сдвиг.

Если расчет устойчивости фундамента по схеме плоского сдвига не вызывает сложностей (имеется стандартный алгоритм решения), расчет по схеме глубинного сдвига рекомендуется производить графоаналитическими методами с использованием круглоцилиндрических или ломаных поверхностей скольжения. Чаще всего принимается круглоцилиндрическая поверхность скольжения, так как использование ломаной поверхности является частным случаем.

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения является наиболее универсальным методом, сочетающим в себе относительно небольшую трудоемкость расчетов и достаточную точность, а также позволяя учитывать неоднородность основания.

По данному методу определяется коэффициент запаса устойчивости на сдвиг из условия:

$$\eta = \frac{\sum M_{s,p}}{\sum M_{s,h}} \geq 1,2, \quad (3)$$

где  $\sum M_{s,p}$ ,  $\sum M_{s,h}$  соответственно суммы моментов сдвигающих и удерживающих сил на 1 м длины фундамента относительно центра вращения, МН·м.

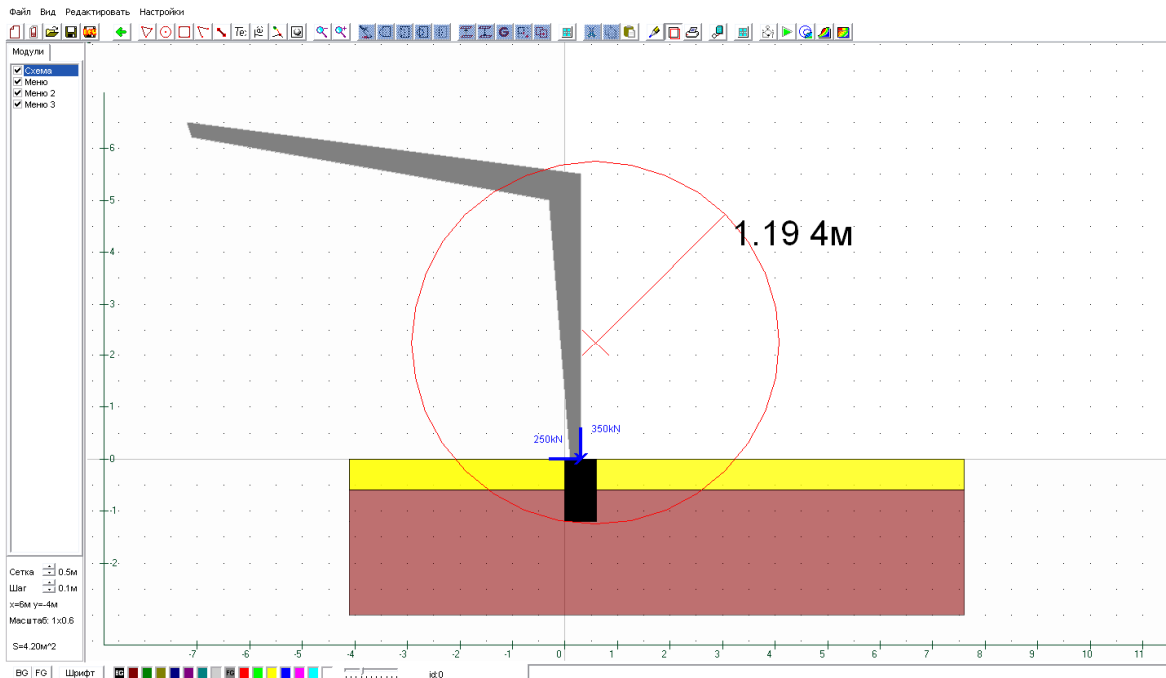
Если значения  $\eta$  меньше, чем по условию (3), следует увеличить размеры фундамента или выполнить другие мероприятия по обеспечению его устойчивости.

Отметим, что метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения в геотехнической практике наиболее широко применяется при оценке устойчивости грунтовых откосов. Существует достаточно много программных комплексов, реализующих данный метод расчета [2]. Основная сложность в его реализации заключается в разработке алгоритма поиска наиболее опасной поверхности скольжения, для которой коэффициент запаса минимальный. Причем для откосов сложной формы наиболее опасных поверхностей скольжения может быть несколько.

Разработанная в Полоцком государственном университете программа FSS-PSU позволяет выполнить расчет устойчивости по методу круглоцилиндрических поверхностей при любых грунтовых условиях. При этом поиск наиболее опасных поверхностей скольжения выполняется итерационным методом по специальному алгоритму. Данная программа является объектно-ассоциативной системой, позволяющей организовать хранение и манипулирование сложноструктурированных данных. В работах [3; 4] определена концепция объектно-ассоциативных систем, установлены её преимущества и отличительные особенности.

Кроме того, программа FSS-PSU позволяет производить не только расчет устойчивости откосов, но и расчет несущей способности (устойчивости) фундаментов. В программе задаются размеры фундамента, на который действуют вертикальная и горизонтальная силы. Фундамент рассматривается как твердое тело, через которое не могут проходить поверхности скольжения. В уровне обреза фундамента прикладываются силы: вертикальная, по центру тяжести фундамента (положительное направление вниз), и горизонтальная (положительное направление вправо). Все поверхности скольжения проходят через левую точку опирания фундамента (при положительной горизонтальной силе).

Для примера на рисунке 2 приведена расчетная схема с результатом определения коэффициента запаса устойчивости плитного фундамента. Размеры фундамента: 1,2 м – высота (соответствует глубине заложения фундамента); 0,6 м – ширина. На фундамент действуют следующие силы: 350 кН – вертикальная; 250 кН – горизонтальная. На расчетной схеме представлено 2 слоя грунта с характеристиками: 1-й – песчаный грунт:  $\gamma = 19,8 \text{ кН/м}^3$ ,  $c = 1 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ; 2-й – глинистый:  $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ ,  $c = 52 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 11^\circ$ .



**1.19 – коэффициент запаса устойчивости фундамента; 4 м – радиус поверхности скольжения**

**Рисунок 2. – Расчетная схема определения коэффициента запаса устойчивости фундамента (полурама показана условно)**

На рисунке приведена наиболее опасная поверхность скольжения. Наименьший коэффициент запаса устойчивости фундамента в этом случае равен 1,19, что меньше требуемого.

Важная особенность представленного программного обеспечения заключается в возможности учета анизотропии прочностных свойств грунтов. Анизотропией прочностных свойств, как показывают многочисленные исследования, обладает большинство грунтов осадочного происхождения. Особенно это касается грунтов с ярко выраженной слоистостью. Можно сказать, что анизотропия присуща грунтам не только с выраженной слоистостью, но также и без неё. Как показано в [5; 6], грунты, залегающие на севере Беларуси, такие как ленточные глины озерно-ледникового происхождения, обладают ярко выраженной анизотропией прочностных свойств.

Экспериментально установлено, что сопротивление сдвигу таких грунтов существенно зависит от ориентации плоскости среза к плоскости слоистости (изотропии). По результатам испытания грунтов вдоль и поперек слоистости определяются прочностные характеристики соответственно по направлению слоистости (вдоль плоскости изотропии) и поперек слоистости (поперек плоскости изотропии). Разность этих характеристик может достигать несколько десятков процентов.

Так как поверхность сдвига в методе круглоцилиндрических поверхностей располагается под различным углом к плоскости слоистости, необходимо определять прочностные характеристики грунтов не только во взаимно перпендикулярных направлениях, но и под различным углом к плоскости сдвига. В программе FSS-PSU определение прочностных характеристик грунта в зависимости от угла наклона слоистости к плоскости сдвига выполняется по следующей формуле [7]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{\alpha} &= \operatorname{tg} \varphi_1 + (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1) \sin^2 \alpha, \\ c_{\alpha} &= c_1 + (c_2 - c_1) \sin^2 \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол наклона площадки сдвига к плоскости слоистости;  $\operatorname{tg} \varphi_1$ ,  $c_1$  – характеристики прочности при сдвиге по направлению слоистости (вдоль плоскости изотропии);  $\operatorname{tg} \varphi_2$ ,  $c_2$  – то же при сдвиге поперек слоистости (поперек плоскости изотропии).

Влияние анизотропии прочностных свойств грунтов на устойчивость основания фундамента распорного сооружения можно проиллюстрировать на примере двухслойного основания со следующими прочностными характеристиками:

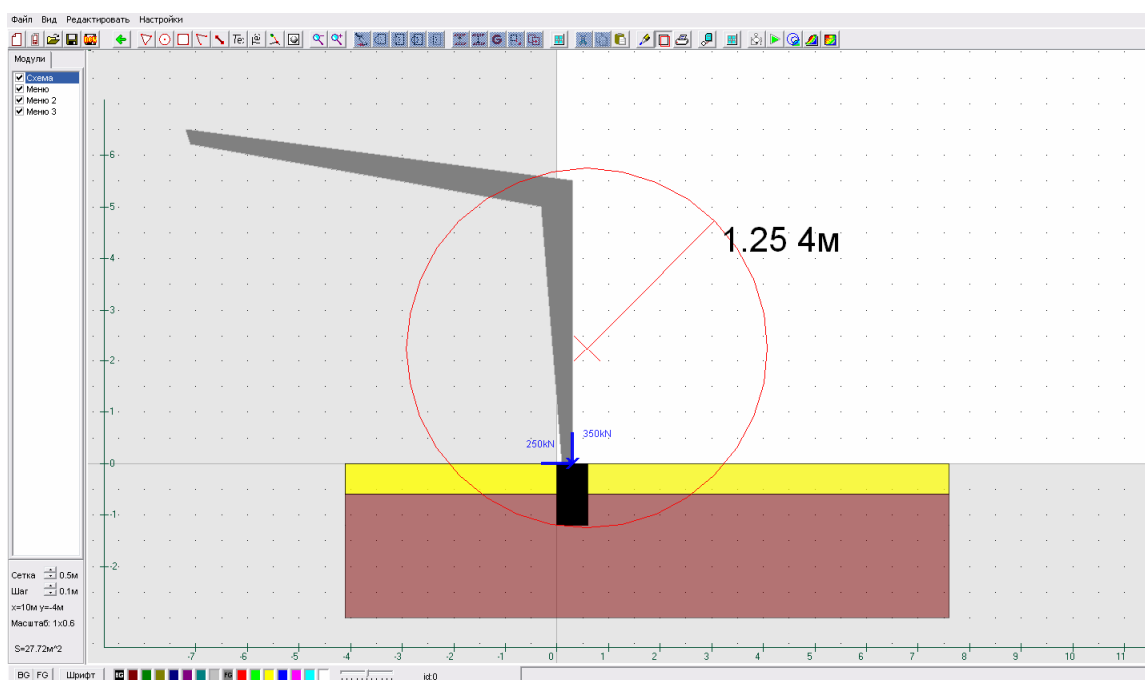
1-й слой:

- вдоль слоистости  $\varphi = 30^\circ$ ,  $c = 1$  кПа;
- поперек слоистости  $\varphi = 35^\circ$ ,  $c = 5$  кПа;

2-й слой:

- вдоль слоистости  $\varphi = 11^\circ$ ,  $c = 52$  кПа;
- поперек слоистости  $\varphi = 14^\circ$ ,  $c = 65$  кПа.

Расчетная схема фундамента и другие исходные данные приняты такие же, как и в вышеописанном примере (см. рис. 2). На рисунке 3 представлен результат определения коэффициента запаса устойчивости плитного фундамента с учетом анизотропии прочностных свойств грунтов.

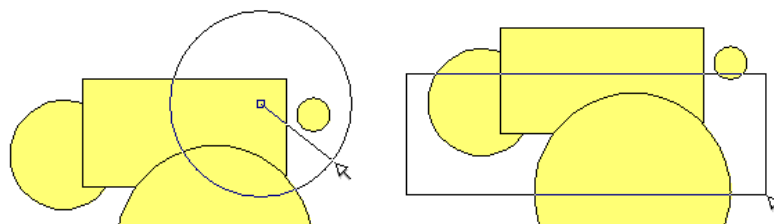


**Рисунок 3. – Расчетная схема определения коэффициента запаса устойчивости фундамента с учетом анизотропии прочностных свойств грунтов**

Как видно из результатов расчета, расположение наиболее опасной поверхности скольжения не изменилось. Однако при учете анизотропии прочностных свойств грунтов коэффициент запаса устойчивости фундамента повысился и составил 1,25, что больше требуемого.

Для реализации расчета в программном комплексе FSS-PSU использовалась библиотека манипулирования произвольными полигонами, разработанная Д.О. Глуховым и Т.М. Глуховой. Программный комплекс предлагает широкий набор инструментов по работе с графическими объектами. Он реализует концепцию интуитивно понятного создания графических и текстовых элементов. Вход в режим создания графических элементов доступен через кнопки панели инструментов редактора.

В редакторе предусмотрено создание готовых графических примитивов (окружность, прямоугольник). В режиме создания данных примитивов (рис. 4) требуется по левой клавише мыши определить всего две точки, определяющие параметр (диагональ, радиус) создаваемого графического примитива.



**Рисунок 4. – Создание окружности и прямоугольника**

Текстовые элементы (горизонтальные и вертикальные) создаются в режиме создания текстового элемента однократным нажатием левой клавиши мыши. По умолчанию текст созданного элемента содержит слово «Текст».

Выделение элементов схемы осуществляется наведением на видимую часть элемента курсора мыши и нажатием левой клавиши мыши. При этом выделенный элемент отмечается красным прямоугольником (рис. 5, а).

При выделении ломаной линии красными прямоугольниками (рис. 5, б) отмечаются точки линии. Допускается множественное выделение элементов при нажатой кнопке Ctrl на клавиатуре.

После выделения элемента над ним можно совершать целый ряд действий:

- удалить;
- скопировать;
- переместить;
- переместить точку ломаной: изменить цвет заливки, изменить цвет контура, изменить прозрачность, изменить шрифт текстового элемента.

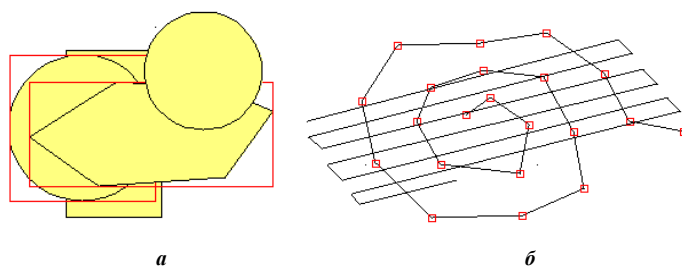


Рисунок 5. – Примеры выделения графических объектов

Программный комплекс предлагает широкий набор функций работы с полигонами. В частности, предлагаются 4 операции над полигонами (рис. 6–9).

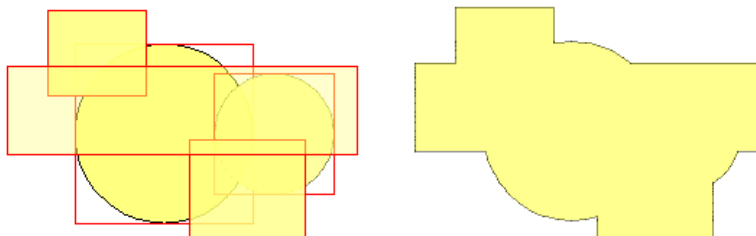


Рисунок 6. – Объединение полигонов

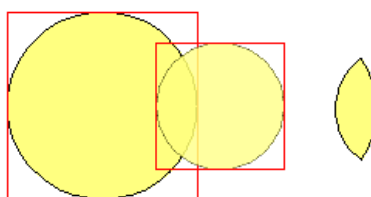


Рисунок 7. – Пересечение полигонов

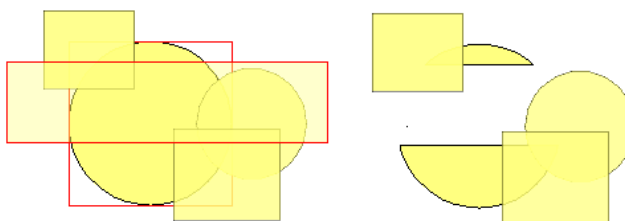


Рисунок 8. – Разность полигонов

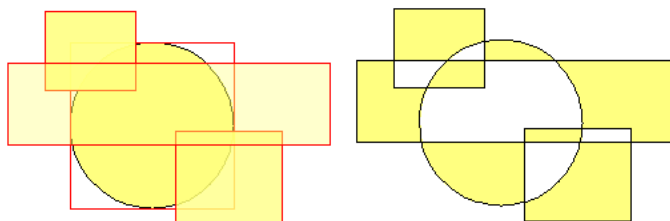


Рисунок 9. – Инверсия пересечения полигонов

Применение данной библиотеки позволяет:

- построить детальную расчетную модель откоса с учетом рассмотренных особенностей;
- выполнить оценку коэффициента устойчивости;
- решить задачу поиска наиболее опасной траектории обрушения.

Визуализация детальной модели приведена на рисунке 10.

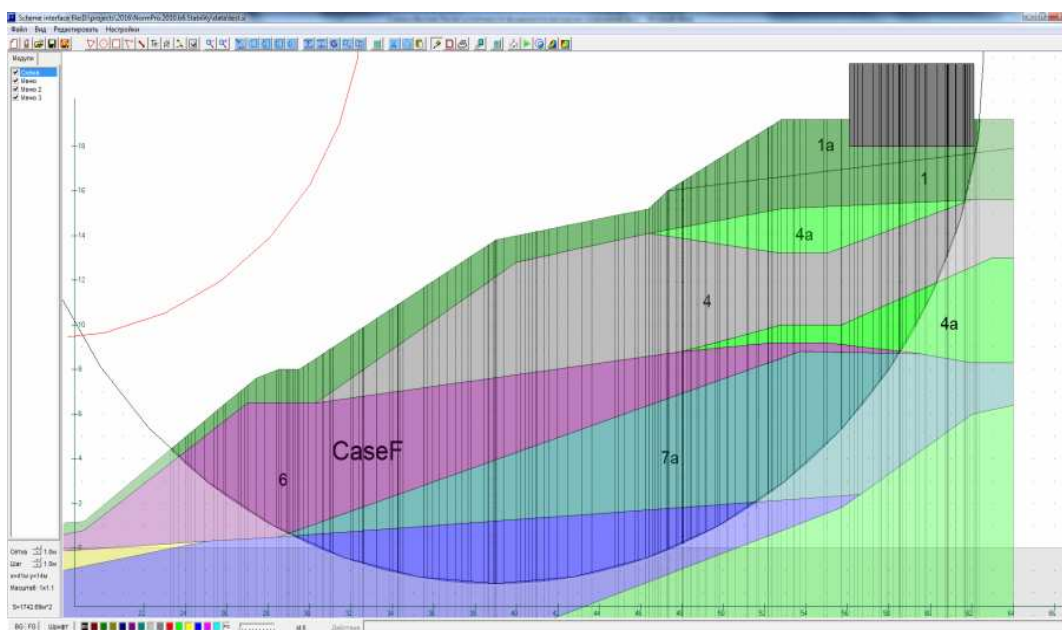


Рисунок 10. – Разбиение укрупненной модели откоса на вертикальные сегменты с высокой степенью детализовки

Вертикальная сила, воздействующая на грунт через основание фундамента, после декомпозиции фундамента на элементарные вертикальные блоки делится между ними пропорционально ширинам элементарных фрагментов.

В заключение проведенной работы, опираясь на результаты анализа полученных данных, можно сделать следующие **выводы**:

- программа расчета FSS-PSU, разработанная в Полоцком государственном университете, позволяет решить широкий круг инженерных задач, связанных с определением предельной нагрузки на основание распорных сооружений и устойчивости откосов, в том числе и с учетом неоднородности грунтов и анизотропии их прочностных свойств;

- учет анизотропии прочностных свойств грунтов позволяет повысить точность проведенных расчетов. Сравнительный анализ расчетов с учетом и без учета анизотропии прочностных свойств грунтов показывает, что учет анизотропии прочностных свойств грунтов существенно влияет на коэффициент запаса устойчивости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика / под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М. : Стройиздат, 1985. – 480 с.

2. Кремнев, А.П. Определение наиболее опасной поверхности скольжения при расчете устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения / А.П. Кремнев, Д.О. Глухов, Н.Н. Вишняков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 8. – С. 37–41.
3. Глухов, Д.О. Объектно-ассоциативный подход к построению алгоритмов расчета и визуализации пространства цилиндрических поверхностей скольжения в расчетах устойчивости откосов / Д.О. Глухов, А.П. Кремнев, Т.М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2011. – № 4. – С. 43–51.
4. Глухов, Д.О. Концепция объектно-ассоциативной базы данных / Д.О. Глухов, А.В. Пранович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2005. – № 4. – С. 55–63.
5. Вишняков, Н.Н. Влияние анизотропии озерно-ледниковых глин на их прочностные характеристики / Н.Н. Вишняков, А.П. Кремнев // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX междунар. науч.-метод. семинара. – Гродно, 2016. – С. 15–19.
6. Kremniou, A. Anisotropy of the strength properties of clays of the north of Belarus / Aliaksander Kremniou, Nikolai Vishniakov // Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic SeaRegion : 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. – Vilnius : Technika, 2016. – P. 114–117.
7. Иванов, П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов : учеб. для гидротехн. специальностей вузов / П.Л. Иванов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1991. – 447 с.

*Поступила 25.11.2016*

**CALCULATION OF FOUNDATIONS BY METHOD  
OF SLICES WITH ANISOTROPY  
OF THE STRENGTH PROPERTIES OF THE SOIL**

**A. KREMNEU, D. HLUKHAU, N. VISHNYAKOU, T. HLUKHAUA**

*This article studies the problem of the calculation of the bearing capacity of foundations spacer structures. Possible options for the calculation of these foundations. A realization of the algorithm for calculating safety factor of the foundation on a computer using a program developed by the Polotsk State University. With this program calculated the foundation of the spacer structure. The possibility of taking into account the anisotropy of the strength properties of the soil in the calculations of the foundations stability. The comparative calculation of the foundation stability with and without allowance for the anisotropy of the strength properties of the soil. Conclusions on the possibility of using the program when calculating the foundations of spacer structures, as well as on account of the anisotropy of the strength properties of the soil in the calculation of these foundations.*

**Keywords:** *foundations of the spacer structures, the algorithm of calculation of the bearing capacity, anisotropy of the strength properties of soils.*