Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2017. № 2 (32). С. 99–107

М. М. Алиев, С. Р. Гилязова, С. В. Шафиева

ПЛОСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ, ПОДЧИНЯЮЩЕЙСЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КУЛОНА – МОРА

Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия

Аннотация. Рассматривается предельное равновесие анизотропной разносопротивляющейся среды типа грунты и горные породы, которая имеет упорядоченную анизотропию прочностных свойств. Выводится условие предельного равновесия в виде обобщения условия Кулона - Мора, представленное в нелинейной форме. Получено условие в компонентах напряжения и выражения для напряжений, удовлетворяющих этому условию. Рассмотрена плоская деформация среды с учетом сил тяжести. Получены обобщенные уравнения Кеттера и основные уравнения характеристик.

Ключевые слова: анизотропная разносопротивляющаяся среда, условие предельного равновесия, закономерность Кулона - Мора, уравнение характеристик.

УДК: 539.37

Введение. Анизотропные грунты и горные породы являются разносопротивляющимися природными материалами, так как имеют различные механические характеристики при испытаниях напряжениями положительного и отрицательного знака. Кроме того, условия залегания таких природных материалов часто обуславливают изменчивость их свойств по направлениям.

Если прочностные или другие характеристики грунтов и горных пород могут быть сформулированы некоторыми непрерывными функциями координат, то такая анизотропия принимается как упорядоченная. Можно встретить также неупорядоченную анизотропию в материалах с дискретными свойствами, математическое выражение которой, для описания этих свойств, требует принятия более сложных моделей, а их практическая реализация порой становится невозможной.

Алиев Мехрали Мирзали оглы
`e-mail:` mmaliev@rambler.ru, доктор технических наук, профессор, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия.
Гилязова Светлана Ришатовна
`e-mail:` gil.svet2011@yandex.ru, старший преподаватель, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия.
Шафиева Светлана Владимировна
`e-mail:` shafieva_sv@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия.

Поступила 11.08.2016

Предельное равновесие анизотропной сыпучей среды было исследовано в ранних работах Д.Д. Ивлева и Т.Н. Мартыновой [1] и представителей Тульской школы механиков под руководством Л.А. Толоконникова (работы В.В. Глаголева и Н.М. Матченко [2], [3], С.Д. Фейгина и Н.М. Матченко [4] и др.).

Предельное равновесие анизотропных грунтов и горных пород рассмотрено также в работах [5], [6], [7].

Линейная зависимость Кулона - Мора

Принимая упорядоченность механических характеристик, воспользуемся подходом, предложенным в [6] Г.А. Гениевым для вывода критерия прочности или условия предельного равновесия, а также для получения основных разрешающих уравнений предельного напряженного состояния анизотропных грунтов и горных пород.

Сущность подхода заключается в том, что из двух зависимостей

$$\tau_n = f(\sigma_n)\text{и} \quad \frac{d}{d\psi}\left[\tau_n - f(\sigma_n)\right] = 0 \tag{1}$$

определяются компоненты напряжения по координатам x, y, включающие прочностные характеристики среды и угол ψ, который выбран как угол между нормалью к площадке скольжения и осью x. В уравнение предельного напряженного состояния входит угол ψ, который, в отличие от изотропной сыпучей среды, совместным решением двух зависимостей из (1) исключить не удается. В (1) τ_n и σ_n - касательное и нормальное напряжения на площадке скольжения.

Изложим последовательность вывода условий предельного равновесия анизотропных грунтов и горных пород, полученных в [5] и в [7].

В обеих работах принимается, что на площадке скольжения между τ_n и σ_n существует линейная зависимость в виде

$$\tau_n = \sigma_n k + \text{c}, \tag{2}$$

где в [1] $\tau_n = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\mu$; (3)

$$\sigma_n = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3) + 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\mu; \tag{3}$$

в [2] $\tau_n = 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\psi + \tau_{xy}\cos 2\psi$; (5)

$$\sigma_n = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\psi - \tau_{xy}\sin 2\psi; \tag{4}$$

μ – угол между нормалью к площадке скольжения и максимальным нормальным напряжением σ_1; ψ – также как в (1); k и c – соответственно тангенс угла внутреннего трения и сцепления среды на площадке скольжения, являющиеся функциями угла μ в [5] и угла ψ в [7].

Условие предельного равновесия выполняется согласно [5], если

$$\frac{d}{d\mu}\left[\tau_n - \sigma_n k - \text{c}\right] = 0, \tag{5}$$

согласно [6] $\frac{d}{d\psi}\left[\tau_n - \sigma_n k - \text{c}\right] = 0$. (8)

Как видно, направление площадки скольжения в [5] связано с направлением главного нормального напряжения, а в [7] с направлением анизотропии (слоистости).

В [5] совместным решением (2) и (5) исключается одно из главных напряжений и выводится уравнение для угла μ как функция σ_3.

В [7], учитывая инвариантность суммы $\sigma_x + \sigma_y = 2\sigma$ относительно поворота осей (угла ψ), из (2) и (8) выводятся зависимости для τ_{xy} и $\sigma_x - \sigma_y$ как функции параметров прочности угла ψ и σ, т.е.

$$\tau_{xy} = f_1(\sigma, \psi, \text{c}, k); \tag{6}$$

$$\sigma_x - \sigma_y = f_2(\sigma, \psi, \text{c}, k). \tag{7}$$

Возведением в квадрат (6) и (7) получено условие предельного равновесия в виде

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4f_1^2(\sigma, \psi, \text{c}, k) + f_2^2(\sigma, \psi, \text{c}, k). \tag{8}$$

Компоненты напряжения, удовлетворяющие (8) определяются в виде

$$\begin{aligned} &\tau_{xy} = f_1\left(\sigma, \psi, c, k\right); \\ &\sigma_x = \sigma + 0,5 f_2(\sigma, \psi, \text{c}, k); \\ &\sigma_y = \sigma - 0,5 f_2(\sigma, \psi, \text{c}, k). \end{aligned} \tag{9}$$

Подставляя (9) в дифференциальные уравнения равновесия в условиях плоской деформации, получим обобщенные уравнения Кеттера для анизотропной среды [7] в переменных σи ψ.

В работах [7,8,9] разрешающие уравнения были решены в численном виде методом характеристик, а также решен ряд задач теории предельного равновесия.

Нелинейная зависимость Кулона - Мора. Иногда линейная зависимость между τ_n и σ_n нарушается, особенно при высоких гидростатических давлениях, в которых находятся горные породы в глубоких горизонтах. В таких случаях рассмотрение нелинейных связей между касательным и нормальным напряжением лучше согласуется с экспериментами.

В работе [10] доказано, что для изотропной горной породы квадратичную зависимость между τ_n и σ_n, принятую в виде

$$\tau_n^2 = \sigma_n k + \text{c}, \tag{10}$$

после определения постоянных k и с из двух видов испытаний можно привести к виду

$$\tau_n^2 = \frac{1}{2}(\sigma_\text{c} - \sigma_\text{p})\sigma_n - \left(\frac{\sigma_c + \sigma_\text{p}}{4}\right)^2, \tag{11}$$

где σ_c, σ_p - соответственно пределы прочности изотропной горной породы на одноосное сжатие и растяжение.

Проверка для различных горных пород подтверждает удовлетворительное совпадение (11) с данными экспериментов и её почти идеальное совпадение с критерием прочности Г.Н. Кузнецова [11], который также исходит из квадратичной зависимости (10), но имеет другой окончательный вид.

Изложенный в [6] подход допускает определение прочностных характеристик грунтов на приборе прямого среза, располагая слои параллельно или перпендикулярно сдвигающей силе. Такие испытания проводились в работе Л. Бьеррума [12].

Рассмотрим модель анизотропной разносопротивляющейся среды в случае нелинейной связи между τ_n и σ_n на площадках скольжения в виде

$$\tau_n^2 = \sigma_n k + \text{c}, \tag{12}$$

где $k = k(\psi)$; $\quad \mathrm{c} = \mathrm{c}(\psi)$.

Согласно (11) примем, что

$$k = k(\psi) = \frac{1}{2}\left[\sigma_{\mathrm{c}}\left(\psi\right) - \sigma_{\mathrm{p}}\left(\psi\right)\right];$$

$$c = c(\psi) = \left[\frac{\sigma_c\left(\psi\right) + \sigma_{\mathrm{p}}\left(\psi\right)}{4}\right]^2,$$

где $\sigma_{\mathrm{c}}\left(\psi\right) = \sigma_{\mathrm{c}}\left(0\right)\cos^2\psi + \sigma_{\mathrm{c}}\left(90\right)\sin^2\psi$;

$$\sigma_{\mathrm{p}}\left(\psi\right) = \sigma_{\mathrm{p}}\left(0\right)\cos^2\psi + \sigma_{\mathrm{p}}\left(90\right)\sin^2\psi;$$

$\sigma_{\mathrm{c}}\left(0\right)$, $\quad \sigma_{\mathrm{c}}\left(90\right)$ – пределы прочности среды (горной породы) при принудительном сжатии поперек и вдоль слоев (рисунок 1);

$\sigma_{\mathrm{p}}\left(0\right)$, $\quad \sigma_{\mathrm{p}}\left(90\right)$ – то же самое при принудительном растяжении (рисунок 2, а);

$\sigma_{\mathrm{p}}\left(0\right)$, $\quad \sigma_{\mathrm{p}}\left(90\right)$ можно также определить методом «бразильская проба» (рисунок 2, б).

Образцы должны быть испытаны так, чтобы имело место смятие (при сжатии) или отрыв (при растяжении). Форма образцов позволяет разрушить их вдоль или поперек слоев.

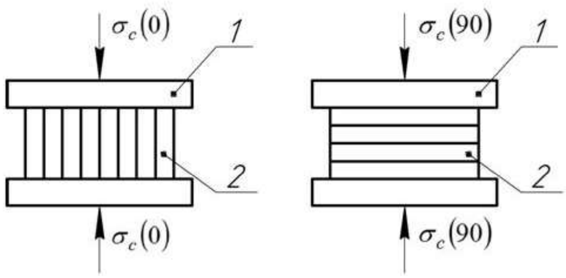
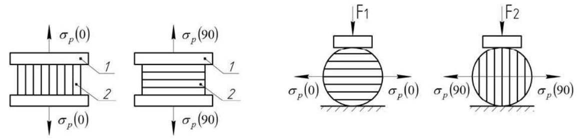


Рисунок 1

1 – обойма; 2 – испытываемый образец



а) б)

Рисунок 2

1 – обойма; 2 – испытываемый образец

Запишем условие минимума функции (12) в виде

$$\frac{d}{d\psi}[\tau_n^2 - \sigma_n k - \mathrm{c}] = 0, \tag{13}$$

или

$$2\tau_n \tau_{n,\psi} - \sigma_{n,\psi} k - \mathrm{c} - \sigma_n k,_{\psi} - \mathrm{c},_{\psi} = 0, \tag{14}$$

где $k,_{\psi} = \frac{dk(\psi)}{d\psi}$; $\mathrm{c},_{\psi} = \frac{d\mathrm{c}(\psi)}{d\psi}$.

В (12) τ_n и σ_n определяются по формулам (5) и (4).

Для простоты обозначим $\tau_n = \mathrm{T}_1$, $\sigma_n = \sigma + \mathrm{T}_2$. Тогда

$$\tau_{n,\psi} = \frac{d\tau_n}{d\psi} = (\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\psi - 2\tau_{xy}\sin 2\psi = -2T_2;$$

$$\sigma_{n,\psi} = \frac{d\sigma_n}{d\psi} = -0,5\,(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\psi - 2\tau_{xy}\cos 2\psi = -2T_1.$$

Подставляя τ_n и σ_n в (12), находим

$$\mathrm{T}_1^2 = (\sigma + \mathrm{T}_2)\,k + \mathrm{c}. \tag{15}$$

Из (13) будем иметь

$$4\mathrm{T}_1\mathrm{T}_2 - 2\mathrm{T}_1 k + (\sigma + \mathrm{T}_2)\,k,_{\psi} + \mathrm{c},_{\psi} = 0. \tag{16}$$

Исключив из (15) и (16) T_1, получим выражение

$$\frac{[(\sigma + \mathrm{T}_2)\,k,_{\psi} + \mathrm{c},_{\psi}]^2}{4\,[k - 2\mathrm{T}_2]^2} = (\sigma + \mathrm{T}_2)\,k + \mathrm{c}, \tag{17}$$

которое приводится к кубическому уравнению вида

$$\mathrm{a}_1\mathrm{T}_2^3 + \mathrm{a}_2\mathrm{T}_2^2 + \mathrm{a}_3\mathrm{T}_2 + \mathrm{a}_4 = 0, \tag{18}$$

где $\mathrm{a}_1 = 16k$;

$$\mathrm{a}_2 = 16\,(\sigma k + \mathrm{c}) - 16k^2 - k,_{\psi}^2;$$

$$\mathrm{a}_3 = 4k^3 - 16k(\sigma k + \mathrm{c}) - 2\sigma k,_{\psi}^2 - 2k,_{\psi}\mathrm{c},_{\psi};$$

$$\mathrm{a}_4 = 4k^2(\sigma k + \mathrm{c}) - \sigma^2 k,_{\psi}^2 - 2\sigma k,_{\psi}\mathrm{c},_{\psi} - \mathrm{c},_{\psi}^2.$$

Уравнение (6) запишем в традиционном виде

$$\mathrm{T}_2^3 + \mathrm{a}\mathrm{T}_2^2 + b\mathrm{T}_2 + d = 0, \tag{19}$$

где $\mathrm{a} = \frac{\mathrm{a}_2}{\mathrm{a}_1}$; $b = \frac{\mathrm{a}_3}{\mathrm{a}_1}$; $d = \frac{\mathrm{a}_4}{\mathrm{a}_1}$.

Решение уравнения (19) осуществим исходя из формулы Кардано

$$\mathrm{T}_2 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \frac{\mathrm{a}}{3}, \tag{20}$$

где $p = b - \frac{\mathrm{a}^3}{3}$; $q = d + \frac{2\mathrm{a}^3}{27} - \frac{ab}{3}$.

Так как

$$\mathrm{T}_1 = 0,5\,(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\psi + \tau_{xy}\cos 2\psi; \tag{21}$$

$$\mathrm{T}_2 = 0,5\,(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\psi - \tau_{xy}\sin 2\psi$$

получим условие предельного равновесия анизотропной разносопротивляющейся среды в следующем виде

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4\left(T_1^2 + T_2^2\right), \tag{22}$$

где T_1 определяется из (15), а T_2 из (20).

Совместное решение (21) определяет компоненты напряжения, удовлетворяющие условию предельного равновесия (22)

$$\sigma_{x,y} = \sigma \pm (T_1 \sin 2\psi + T_2 \cos 2\psi)\,; \tag{23}$$

$$\tau_{xy} = T_1 \cos 2\psi - T_2 \sin 2\psi.$$

Основные разрешающие уравнения. Уравнения равновесия с учетом собственного веса имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{\mathrm{x}}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{xy}}}{\partial \mathrm{y}} = 0; \tag{24}$$

$$\frac{\partial \tau_{\mathrm{xy}}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \sigma_{\mathrm{y}}}{\partial \mathrm{y}} = \gamma,$$

где γ - объемный вес среды.

Подставляя (23) в (24), получим

$$\begin{aligned} &F_1\tfrac{\partial\sigma}{\partial \mathrm{x}} + F_2\tfrac{\partial\psi}{\partial x} + \mathrm{H}_1\tfrac{\partial\sigma}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{H}_2\tfrac{\partial\psi}{\partial \mathrm{y}} = 0;\\ &\mathrm{H}_1\tfrac{\partial\sigma}{\partial x} + H_2\tfrac{\partial\psi}{\partial x} + F_3\tfrac{\partial\sigma}{\partial y} - F_2\tfrac{\partial\psi}{\partial y} = \gamma, \end{aligned} \tag{25}$$

где $F_1 = 1 + R_1 \sin 2\psi + M_2 \cos 2\psi$;

$$F_2 = R_2 \sin 2\psi + 2T_1 \cos 2\psi + M_1 \cos 2\psi - 2T_2 \sin 2\psi;$$

$$F_3 = 1 - R_1 \sin 2\psi + M_2 \cos 2\psi;$$

$$H_1 = R_1 \cos 2\psi - M_2 \sin 2\psi;$$

$$H_2 = R_2 \cos 2\psi - 2T_1 \sin 2\psi - M_1 \sin 2\psi - 2T_2 \cos 2\psi;$$

$$R_1 = \frac{k}{2\sqrt{(\sigma + T_2)k + c}} + M_2 k;$$

$$R_2 = \frac{1}{2\sqrt{(\sigma + T_2)k + c}}(z_1\sigma + M_1 k + z_1 T_2 + z_3);$$

$$M_1=\left[\left(\tfrac{q}{12N}-\tfrac{1}{6}\right)\left(-\tfrac{q}{2}+N\right)^{-\frac{2}{3}}-\left(\tfrac{q}{12N}+\tfrac{1}{6}\right)\left(-\tfrac{q}{2}-N\right)^{-\frac{2}{3}}\right](m_1z_1+m_3z_3-$$
$$-m_4z_2-m_5z_4)+\left[\tfrac{p^2}{54N}\left(\left(-\tfrac{q}{2}+N\right)^{-\frac{2}{3}}-\left(-\tfrac{q}{2}-N\right)^{-\frac{2}{3}}\right)\right](n_1z_1-n_3z_3-n_4z_2-$$
$$\left.-\tfrac{2}{a_1}z_1z_4\right)-\tfrac{2}{3a_1}\left(8\sigma z_1+8z_3-16kz_1-z_1z_2-8a^2z_1\right);$$

$$M_2=\left[\left(\tfrac{q}{12N}-\tfrac{1}{6}\right)\left(-\tfrac{q}{2}+N\right)^{-\frac{2}{3}}-\left(\tfrac{q}{12N}+\tfrac{1}{6}\right)\left(-\tfrac{q}{2}-N\right)^{-\frac{2}{3}}\right]m_2-$$
$$-\left[\tfrac{p^2}{54N}\left(\left(-\tfrac{q}{2}+N\right)^{-\frac{2}{3}}-\left(-\tfrac{q}{2}-N\right)^{-\frac{2}{3}}\right)\right]n_2-\tfrac{16k}{3a_1};$$

$$N=\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}}.$$

Здесь значения переменных $m_1, m_2, ..., n_1, n_2, ..., z_1, z_2, ...$ и др. для простоты не приводятся. Эти переменные также являются функциями ψ и σ.

Дифференциальные уравнения характеристик системы (25) получены в виде

$$\frac{dy}{dx}=-\frac{M_0}{2L_0}+\sqrt{\left(\frac{M_0}{2L_0}\right)^2-\frac{G_0}{L_0}};\quad (I\text{семейство})\tag{26}$$

$$\frac{dy}{dx}=-\frac{M_0}{2L_0}-\sqrt{\left(\frac{M_0}{2L_0}\right)^2-\frac{G_0}{L_0}},\quad (II\text{семейство})\tag{27}$$

где $M_0=-F_1F_2-H_1H_2+F_2F_3-H_1H_2=(F_3-F_1)F_2-2H_1H_2$;

$$L_0=H_1^2-F_1F_3;$$

$$G_0=H_2^2+F_2^2.$$

Соотношения на характеристиках системы (25) имеют вид

$$d\sigma W_1-d\psi P_1=\gamma H_2dx-\gamma H_1dy;\quad (I\text{семейство})\tag{28}$$

$$d\sigma W_2-d\psi P_2=\gamma H_2dx-\gamma H_1dy,\quad (II\text{семейство})\tag{29}$$

где $W_1=(F_2F_3-H_1H_2)+\left(H_2^2+F_2^2\right)\Pi_1$;

$$W_2=(F_2F_3-H_1H_2)+\left(H_2^2+F_2^2\right)\Pi_2;$$

$$P_1=P_2=-H_1F_2-H_2F_3;$$

$\Pi_1=\dfrac{dx}{dy}$ определяется по (29);

$\Pi_2=\dfrac{dx}{dy}$ определяется по (30).

Представляя (29), (30), (31) и (32) в конечноразностной форме можно численно решить ряд задач плоской деформации анизотропных грунтов и горных пород. Алгоритм и программа решения подобных задач приведены в работах [7], [8], [9].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ивлев Д. Д., Мартынова Т. Н. Об условии полной пластичности для осесимметричного состояния // ПМТФ. – 1963. - №3. – С. 102-104.

[2] Глаголев В. В., Матченко, Н. М. Устойчивость анизотропных оснований // Труды ТПИ “Исследования по механике деформируемой среды”. - Тула. – 1973.

[3] Глаголев В. В., Матченко, Н. М. Устойчивость анизотропных откосов // Сб. “Технология машиностроения”. – Тула. – Вып. 28. – 1972.

[4] Фейгин С. Д., Матченко Н. М. Несущая способность анизотропных оснований // Сб. “Работы по механике сплошных сред”. Тула: Тульский политехнический институт, 1975.

[5] Бугров А. К., Голубев А. И. Анизотропные грунты и основания сооружений. СПб: “Недра”, 1993. 245 с.

[6] Гениев Г. А. Плоская деформация анизотропной идеально пластической среды // Строит. механика и расчет сооружений. 1982. №3. С. 14-18.

[7] Алиев М. М., Гениев Г. А. Расчет несущей способности анизотропных оснований сооружений // Изв. вузов. Строительство. 2001. №6. С. 18-22.

[8] Алиев М. М., Алексеев Б. Г., Файзрова И. Н. Предельное напряженное состояние анизотропной сыпучей среды, угол внутреннего трения которой является функцией координат // Изв. вузов. Строительство. 2001. №7. С. 17-21.

[9] Алиев М. М., Миндиярова Н. И. Предельное равновесие анизотропной неоднородной сыпучей среды, характеристики прочности которой являются функциями направления и координат // Изв. вузов. Строительство. 2002. №9. С. 20-24.

[10] Алиев М. М., Каримова Н. Г., Гилязова С. Р. Нелинейный вариант критерия Кулона-Мора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №7. С. 226-232.

[11] Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. Задачи и методы их изучения в связи с вопросами управления горным давлением. М.: Углетехиздат, 1947. 176 с.

[12] Бьеррум Л. Проблемы механики строительства на структурно-неустойчивых и слабых грунтах // Ген. докл. Международ. конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. М.: Стройиздат, 1975. С. 98–165.

M. M. Aliev, S. R. Gilyazova, S. V. Shafieva

PLANE DEFORMATION OF ANISOTROPIC MEDIUM PLASTICITY BENDING THE LAWS OF NONLINEAR BY COULOMB - MOHR

Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk

Abstract. There investigated limit equilibrium of anisotropic multimodulus medium in terms of ground or rock, which are ordered anisotropic strength properties. There developed limit equilibrium equation in the form of generalizations of Coulomb - Mohr's conditions which is presented in a nonlinear manner. There obtained the condition in the voltage components and expressions for the stresses that satisfy this condition. There investigated an environment plane deformation taking into account the forces of gravity. There developed Kettera's equation and the main characteristics of the equation.

Keywords: anisotropic multimodulus medium, limit equilibrium conditions, law of Coulomb - Mohr, equation of the characteristics.

REFERENCES

[1] *Ivlev, D.D., Martynova, T.N.* About the conditions of total plasticity for axisymmetric state // AMTP. – 1963. – №3. – P. 102-104.

[2] *Glagolev, V.V., Matchenko, N.M.* The hardness of anisotropic foundations // The works of TPI "The research on the mechanics of deformable medium". – Tula. - 1973.

[3] *Glagolev, V.V., Matchenko, N.M.* The hardness of anisotropic slopes // SP. "Technology of mechanical engineering". – Tula. - 1972.

[4] *Feigin, S.D., Matchenko, N.M.* Load bearing ability of anisotropic foundations // SP. "The works on the mechanics of continuous medium". – Tula: Tula Polytechnic Institute, 1975.

[5] *Bugrov, A.K., Golubev, A.I.* Anisotropic soils and foundation structures. - St. Petersburg: "Nedra", 1993. - 245 p.

[6] *Geniev, G.A.* Plane deformation of anisotropic perfectly plastic medium // Build. mechanics and calculation of constructions. – 1982. - №3. – P. 14-18.

[7] *Aliev, M.M., Geniev, G.A.* Calculation of bearing capacity of anisotropic structures bases // Inf. universities. Building. – 2001. - №6. – P. 18-22.

[8] *Aliev M.M., Alekseev B.G., Fayzrova I.N.* Limit stress state of anisotropic granular medium, internal friction angle which is a function of the coordinates // Inf. universities. Building. – 2001. - №7. – P. 17-21.

[9] *Aliev, M.M., Mindiyarova, N.I.* Limit equilibrium anisotropic inhomogeneous granular medium, the characteristics of which are functions of the strength and direction of the coordinate // Inf. universities. Building. – 2002. - №9. – P. 20-24.

[10] *Aliev, M.M., Karimova, N.G., Gilyazova, S.R.* Nonlinear Coulomb - Mohr criterion // Mountain information-analytical bulletin. – 2015. - №7. – P. 226-232.

[11] *Kuznetsov, G.N.* The mechanical properties of rocks. Objectives and methods of their study due to rock pressure control issues. – M.: Ugltechissue, 1947. – 176 p.

[12] Bjerrum, L. Problems of construction on structurally unstable and weak soils // Gene. rep. The International. Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – M.: Buildissue, 1975. – P. 98-165.

Aliev Mekhrali Mirzali ogly
e-mail: mmaliev@rambler.ru, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Transportation and storage of oil and gas" Almetyevsk State Oil Institute, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Lenin street, 2.

Gilyazova Svetlana Rishatovna
e-mail: gil.svet2011@yandex.ru, Senior Lecturer of the Department "Oil and gas equipment and technology of mechanical engineering" Almetyevsk State Oil Institute, Republic of Tatarstan, Almetyevsk.

Shafieva Svetlana Vladimirovna
e-mail: shafieva_sv@mail.ru, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of "Oil and gas equipment and technology of mechanical engineering" Almetyevsk State Oil Institute, Republic of Tatarstan, Almetyevsk.