

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ (НС РАН)
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (МНИЦ - ГП)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ



XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

27 - 29 апреля 2022 года
г. Бишкек



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР –
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН**

**XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**Сборник материалов
XIV Международной конференции молодых ученых и студентов**

**27-29 апреля 2022 года
г. Бишкек**

О ДЕФОРМАЦИИ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ МАРКИ «Т» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

Николаев Я.С.
nikolaev.yark@mail.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Рассмотрены экспериментальные данные, представленные в монографии: Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютин Н.С. «Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород» (2-е изд. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. 2019. 132 с). Проанализированы (судя по значениям параметров Лодэ-Надаи для напряжений и деформаций) случаи обобщенного растяжения, сжатия и сдвига, возникающие при соответствующем трехосном сжатии призматических образцов угля марки «Т». Показано, что во всех таких случаях объемного нагружения не упругая деформация перед разрушением образцов содержит составляющую всестороннего разрыхления. При этом диаграммы «максимальный сдвиг – максимальное касательное напряжение» подобны при указанных трех видах напряженного состояния, а степень упрочнения данной горной породы зависит от предварительного всестороннего сжатия образцов. Сделано заключение о преобладании сдвигового механизма разрушения при всех рассмотренных программах нагружения.

Ключевые слова: горная порода, объемное нагружение, обобщенное растяжение, сжатие и сдвиг, упрочнение и разрыхление.

Введение. Горные породы естественного залегания в массиве и около различных выработок находятся в состоянии неравномерного трехосного сжатия. Моделирующие такое состояние лабораторные испытания должны осуществляться [1] с учетом вида напряженно-деформированного состояния. Одни из первых таких испытаний для известняка и мрамора проведены в [2].

В серии опытов, представленных в монографии [3], каждый призматический образец угля марки «Т» (с размерами от 4,9 до 5,4 см) предварительно нагружался путем равномерного всестороннего сжатия по трем осям до различного уровня напряжения: -4.96 МПа, -20.6 МПа, -44.4 МПа. Как принято в сопротивление материалов, напряжение сжатия считалось отрицательным, а напряжение растяжения – положительным. Наименьшее по модулю гидростатическое давление (4,96 МПа) задавалось так, чтобы при последующей догрузке, было реализовано состояние обобщенного растяжения, если судить по значениям параметров Лодэ-Надаи для напряжений (μ_σ) и для деформаций (μ_ε). После гидростатического давления -20,6 МПа далее создавалось состояние обобщенного сдвига. И, наконец, после давления -44,4 МПа реализовано состояние обобщенного сжатия.

Параметры $\mu_\sigma, \mu_\varepsilon$ представляются через главные напряжения и деформации ($\sigma_i, \varepsilon_i, i = 1, 2, 3$) в виде:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}; \quad \mu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (1)$$

Значение $\mu_\sigma = -1$ соответствует случаю обобщенного растяжения, при котором главные напряжения задаются так, что (с учетом знака напряжений) $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Значение $\mu_\sigma = 0$ достигается при условии:

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \quad (\mu_\sigma = 0) \quad (2)$$

это случай обобщенного сдвига. При обобщенном сжатии ($\mu_\sigma = 1$) $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$.

Рассмотрим исходные экспериментальные данные [3], полученные в опытах при указанных трех видах напряженного состояния.

1. Обобщенный сдвиг. Начальное гидростатическое сжатие: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 = -20.6$ МПа. Реализованная в опыте последующая программа нагружения и полученные значения главных напряжений и деформаций, а также параметров Лодэ-Надаи ($\mu_\sigma, \mu_\varepsilon$) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Компоненты главных напряжений и главных деформаций угля марки "Г" при не равномерном трехосном сжатии в условиях обобщенного сдвига

ε_1 %	σ_1 МПа	ε_2 %	σ_2 МПа	ε_3 %	σ_3 МПа	μ_σ	μ_ε
-0.4	-3.8	-0.4	-5.2	-0.48	-9.71	0.526227	1
-0.8	-10.3	-0.78	-10.5	-0.94	-16.2	0.932203	1.2857143
-1.26	-20.6	-2.25	-41.9	-3.23	-70.1	0.139394	-0.005076
-1.09	-20.6	-2.6	-52.3	-3.98	-91.7	0.108298	-0.044983
-0.82	-20.6	-2.91	-62.8	-4.7	-113	0.08658	-0.07732
-0.5	-20.6	-3.22	-73.2	-5.5	-135	0.08042	-0.088
-0.25	-20.6	-3.32	-83.7	-6.55	-156	0.067947	0.0253968
0.63	-20.6	-3.38	-88.9	-6.91	-167	0.06694	-0.06366
1.02	-20.6	-3.42	-94.2	-7.8	-178	0.064803	-0.006803
1.59	-20.6	-3.48	-99.4	-8.5	-189	0.064133	-0.004955

Проверим условие достижения в опыте состояния обобщенного сдвига и вычислим для напряжений и деформаций компоненты шаровых тензоров (σ_0, ε_0) и тензоров-девиаторов ($\sigma_i^\partial, \varepsilon_i^\partial$ $i = 1, 2, 3$):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \quad (3)$$

$$\sigma_i^\partial = \sigma_i - \sigma_0 \quad \varepsilon_i^\partial = \varepsilon_i - \varepsilon_0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

Обозначим через σ_2^* расчетное значение среднего главного напряжения, вычисленное согласно формуле (2) по экспериментальным значениям максимального и минимального главных напряжений. Отклонение величины σ_2^* от экспериментального напряжения σ_2 (представленного в табл. 1) вычислено по формуле:

$$\Delta_\sigma = \left(\frac{\sigma_2^* - \sigma_2}{\sigma_2} \right) \cdot 100(\%) \quad (5)$$

Результаты этих вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений по формулам (2), (3) и (5)

σ_0	σ_2^*	Δ_σ (%)	σ_1^∂	σ_2^∂	σ_3^∂
-12.3333	-13.25	26.19047619	2.033333	1.833333	-3.86667
-44.2	-45.35	8.233890215	23.6	2.3	-25.9
-54.8667	-56.15	7.361376673	34.26667	2.566667	-36.8333
-65.4667	-66.8	6.369426752	44.86667	2.666667	-47.5333
-76.2667	-77.8	6.284153005	55.66667	3.066667	-58.7333
-86.7667	-88.3	5.495818399	66.16667	3.066667	-69.2333
-92.1667	-93.8	5.511811024	71.56667	3.266667	-74.8333
-97.6	-99.3	5.414012739	77	3.4	-80.4
-103	-104.8	5.432595573	82.4	3.6	-86

Таким образом, как видно из таблиц 1 и 2, состояние обобщенного сдвига (если судить по соотношениям между главными напряжениями согласно формулам (1) и (2)) достигается при догрузке после начального гидростатического давления, начиная с 3-ей позиции установившейся программы догрузки. При этом в деформированном состоянии можно отметить следующие особенности.

Сравним полученные в эксперименте значения деформации ε_2 с соответствующими значениями компонент шарового тензора (табл.3.). Практически эти значения равны между собой. Это первая особенность для данного случая нагружения.

Компонента ε_2^{∂} по модулю на порядок меньше двух других компонент, для которых выполняется равенство $\varepsilon_1^{\partial} \approx -\varepsilon_3^{\partial}$. Это обстоятельство в совокупности с отмеченной особенностью свидетельствует о том, что в опыте наблюдалось состояние почти чистого сдвига в плоскости действия главных напряжений 1-3. Кроме того, $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_0$ (это вторая особенность деформированного состояния). Следовательно, можно считать, что выполняется гипотеза В.В.Новожилова [4] о всестороннем разрыхлении (дилатансии) материалов, обладающих остаточным изменением объема при разрушении. Иначе говоря, в рассматриваемом случае правомерно полагать, что деформация ε_2 происходит полностью за счет уплотнения материала в данном направлении. Это вторая особенность осуществленного обобщенного сдвига.

Обозначим:

$$\varepsilon_2^* = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{2} \quad (6)$$

Это расчетное значение указанной деформации действительно мало отличается от фиксированного в опыте значения (ε_2); расхождение между ними определялось по формуле:

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon_2^* - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right) \cdot 100(\%) \quad (7)$$

Таблица 3 – Состояние обобщенного сдвига при выполнении гипотезы В.В.Новожилова о всестороннем разрыхлении материалов

ε_2	ε_0	ε_1^{∂}	ε_2^{∂}	ε_3^{∂}	ε_2^*	$\Delta\varepsilon (\%)$
-0.4	-0.42667	0.026667	0.026667	-0.05333	-0.44	-9.09091
-0.78	-0.84	0.04	0.06	-0.1	-0.87	-10.3448
-2.25	-2.24667	0.986667	-0.00333	-0.98333	-2.245	0.222717
-2.6	-2.55667	1.466667	-0.04333	-1.42333	-2.535	2.564103
-2.91	-2.81	1.99	-0.1	-1.89	-2.76	5.434783
-3.22	-3.07333	2.573333	-0.14667	-2.42667	-3	7.333333
-3.32	-3.37333	3.123333	0.053333	-3.17667	-3.4	-2.35294
-3.38	-3.22	3.85	-0.16	-3.69	-3.14	7.643312
-3.42	-3.4	4.42	-0.02	-4.4	-3.39	0.884956
-3.48	-3.46333	5.053333	-0.01667	-5.03667	-3.455	0.723589

2. Обобщенное сжатие. Начальное гидростатическое сжатие $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 = -44.4$ МПа. Реализованная программа догрузки и полученные значения главных деформаций (ε_i , $i = 1, 2, 3$), а также вычисленные параметры Лодэ-Надаи представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Компоненты главных напряжений и главных деформаций угля марки "Т" в условиях обобщенного сжатия

ε_1 %	σ_1 МПа	ε_2 %	σ_2 МПа	ε_3 %	σ_3 МПа	μ_σ	μ_ε
-0.46	-23.5	-0.5	-23.5	-0.56	-27.2	1	0.2
-0.73	-44.4	-0.8	-44.4	-1.41	-79.3	1	0.794118
-0.57	-44.4	-0.68	-44.4	-1.77	-102	1	0.816667
-0.37	-44.4	-0.56	-44.4	-2.33	-125	1	0.806122
-0.02	-44.4	-0.38	-44.4	-2.93	-147	1	0.752577
0.46	-44.4	-0.06	-44.4	-3.76	-170	1	0.753555
0.73	-44.4	0.14	-44.4	-4.22	-181	1	0.761616
1.86	-44.4	0.37	-44.4	-5.16	-204	1	0.575499
2.44	-44.4	0.58	-44.4	-5.8	-213	1	0.548544

Как видно из табл.4, напряженное состояние обобщенного сжатия действительно в опыте достигается ($\mu_\sigma = 1$). Однако деформированное состояние находится между состояниями сжатия и сдвига ($1 > \mu_\varepsilon > 0$). При этом деформация ε_2 к моменту разрушения образца по модулю на порядок меньше деформации ε_3 и меньше деформации ε_1 . Это означает, что разрушение может происходить (в случае пропорциональности девиаторов напряжений и деформаций) по площадке действия максимального касательного напряжения (τ_{13}). Следовательно, как и в случае обобщенного сдвига, деформация ε_2 происходит (почти) полностью за счет всестороннего уплотнения. Вычтем значения ε_2 из значений двух других деформаций ($\varepsilon_1, \varepsilon_3$) и обозначим $\varepsilon_1^*, \varepsilon_3^*$ ($\varepsilon_i^* = \varepsilon_i - \varepsilon_2; i = 1, 3$). Тогда средняя деформация ε_0^* определяется формулой:

$$\varepsilon_0^* = \frac{1}{2}(\varepsilon_1^* + \varepsilon_3^*), \quad (8)$$

а компоненты девиатора деформаций ε_i^∂ ($i = 1, 3$) – формулой:

$$\varepsilon_i^\partial = \varepsilon_i^* - \varepsilon_0^* \quad (i = 1, 3) \quad (9)$$

Результаты вычислений по формулам (8) - (9) представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Компоненты девиатора деформаций при обобщенном сжатии

ε_1^*	ε_3^*	ε_0^*	ε_1^∂	ε_3^∂
0.04	-0.06	-0.01	0.05	-0.05
0.07	-0.61	-0.27	0.34	-0.34
0.11	-1.09	-0.49	0.6	-0.6
0.19	-1.77	-0.79	0.98	-0.98
0.36	-2.55	-1.095	1.455	-1.455
0.52	-3.7	-1.59	2.11	-2.11
0.59	-4.36	-1.885	2.475	-2.475
1.49	-5.53	-2.02	3.51	-3.51
1.86	-6.38	-2.26	4.12	-4.12

3. Обобщенное растяжение. Начальное гидростатическое сжатие $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 = -4.96$ МПа. Необходимые для анализа исходные экспериментальные данные (подобные двум предыдущим случаям) представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Компоненты главных напряжений и главных деформаций угля марки "Т" при не равномерном трехосном сжатии в условиях обобщенного растяжения

ε_1 %	σ_1 МПа	ε_2 %	σ_2 МПа	ε_3 %	σ_3 МПа	ε_0	μ_σ	μ_ε
0	-0.62	0	-0.65	0	-1.06	0		
-0.19	-3.97	-0.258	-4.16	-0.503	-4.23	-0.317	-0.46154	0.565495
-0.266	-4.96	-0.378	-5.2	-0.584	-5.29	-0.40933	-0.45455	0.295597
-0.247	-4.96	-0.457	-10.4	-0.785	-10.6	-0.49633	-0.92908	0.219331
-0.228	-4.96	-0.577	-20.8	-0.986	-21.2	-0.597	-0.95074	0.079156
-0.171	-4.96	-0.895	-31.2	-1.27	-31.7	-0.77867	-0.9626	-0.31756
-0.057	-4.96	-1.27	-41.6	-1.71	-42.3	-1.01233	-0.96251	-0.46763
-0.019	-4.96	-1.57	-52	-1.93	-52.9	-1.173	-0.96245	-0.62323
0.228	-4.96	-1.83	-62.4	-2.15	-63.5	-1.25067	-0.96242	-0.73087
0.323	-4.96	-1.91	-64.5	-2.22	-65.6	-1.269	-0.96372	-0.75619
0.684	-4.96	-2.01	-66.6	-2.37	-67.7	-1.232	-0.96493	-0.76424
1.31	-4.96	-2.27	-68.7	-2.6	-69.8	-1.18667	-0.96607	-0.8312
2.02	-4.96	-2.6	-70.8	-2.92	-72	-1.16667	-0.9642	-0.87045

Как видно из табл.6, при установившемся режиме догрузки напряженно-деформированное состояние обобщенного растяжения действительно достигается с достаточно высокой точностью, особенно к моменту разрушения образца (когда $\mu_\sigma \approx \mu_\varepsilon$). Вычислим компоненты девиаторов напряжений и деформаций ($\sigma_i^d, \varepsilon_i^d$ $i=1,2,3$), а также главные касательные напряжения и главные сдвиги:

$$\tau_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) ; \tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad \gamma_{12} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) ; \gamma_{13} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (10)$$

Результаты вычислений по формулам (10) представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Главные касательные напряжения и главные сдвиги при обобщенном растяжении

σ_1^d	σ_2^d	σ_3^d	ε_1^d	ε_2^d	ε_3^d	τ_{12}	τ_{13}	γ_{12}	γ_{13}
0.15	-0.04	-0.11	0.127	0.059	-0.186	0.095	0.13	0.068	0.313
0.19	-0.05	-0.14	0.143333	0.031333	-0.17467	0.12	0.165	0.112	0.318
3.693333	-1.74667	-1.94667	0.249333	0.039333	-0.28867	2.72	2.82	0.21	0.538
10.69333	-5.14667	-5.54667	0.369	0.02	-0.389	7.92	8.12	0.349	0.758
17.66	-8.58	-9.08	0.607667	-0.11633	-0.49133	13.12	13.37	0.724	1.099
24.66	-11.98	-12.68	0.955333	-0.25767	-0.69767	18.32	18.67	1.213	1.653
31.66	-15.38	-16.28	1.154	-0.397	-0.757	23.52	23.97	1.551	1.911
38.66	-18.78	-19.88	1.478667	-0.57933	-0.89933	28.72	29.27	2.058	2.378
40.06	-19.48	-20.58	1.592	-0.641	-0.951	29.77	30.32	2.233	2.543
41.46	-20.18	-21.28	1.916	-0.778	-1.138	30.82	31.37	2.694	3.054
42.86	-20.88	-21.98	2.496667	-1.08333	-1.41333	31.87	32.42	3.58	3.91
44.29333	-21.5467	-22.7467	3.186667	-1.43333	-1.75333	32.92	33.52	4.62	4.94

Из табл.7 следует, что в состоянии обобщенного растяжения диаграммы $\tau_{12} \sim \gamma_{12}$ и $\tau_{13} \sim \gamma_{13}$ практически идентичны. Это означает *возможную* реализацию сдвигов по двум взаимно перпендикулярным площадкам, по которым действует максимальное касательное напряжение. Иначе говоря, сдвиговой механизм разрушения происходит и в рассмотренном случае обобщенного растяжения.

Диаграммы максимальное касательное напряжение ~ максимальный сдвиг для трех проанализированных случаев неравномерного трехосного сжатия представлены на рис.1.

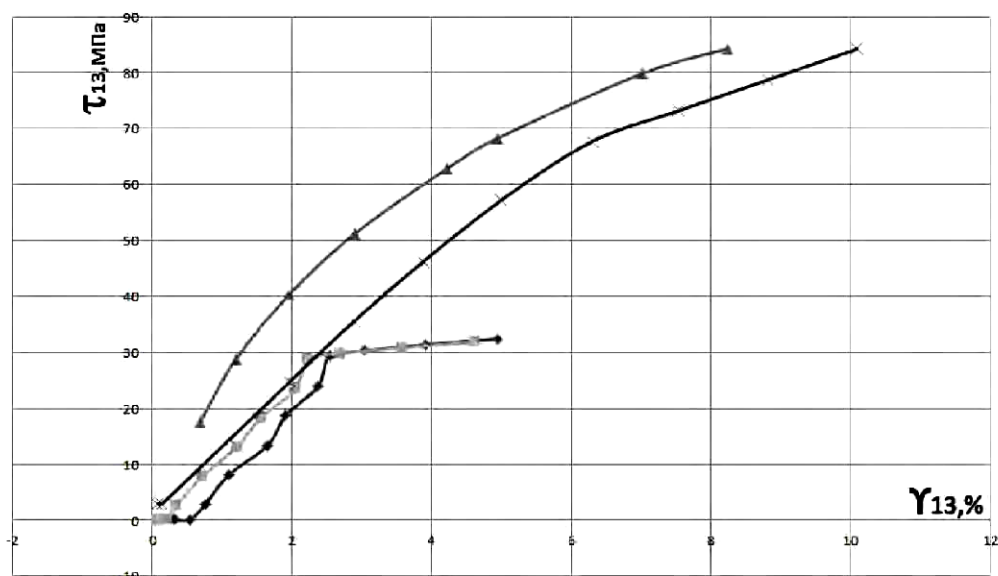


Рисунок 1 – Диаграммы деформаций при трех видах неравномерного трехосного сжатия:
 ▲ Сжатие ◆ Растяжение X Сдвиг ■ Растяжение в координатах $\tau_{12} \sim \gamma_{12}$

Выводы.

1. Как видно из рис.1, диаграммы деформаций при трех видах осуществленного в опытах [3] объемного сжатия образцов подобны между собой. Разная степень упрочнения при одной и той же величине деформации в каждом случае нагружения объясняется разным состоянием структуры соответствующих образцов, которые предварительно подвергались неодинаковому гидростатическому давлению. Такой характер указанных деформаций свидетельствует о достоверности представленных в [3] экспериментальных данных.

2. Строгой пропорциональности между компонентами девиаторов напряжений и деформаций не наблюдалось ($\mu_\sigma \neq \mu_\epsilon$) во всех рассмотренных случаях нагружения. Вместе с тем, для данной горной породы выявлен сдвиговой механизм деформации и разрушения с наложением всестороннего уплотнения (подтверждающего гипотезу В.В.Новожилова о равномерной дилатансии во всех главных направлениях тензора напряжений).

3. Именно из-за влияния дилатансии плоскость среза (судя по картинам разрушения образцов в [3, рис. 2.16]) не совпадает с площадкой действия максимального касательного напряжения. Для установления ориентации плоскости среза необходимы дополнительные экспериментальные данные в состояниях нагружения, «промежуточных» между сдвигом и растяжением, а также между сжатием и сдвигом (как это предусмотрено, в частности, ГОСТ 21153.3–88 [5]).

Литература

1. Шемякин Е.И. Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глубоких месторождений угля и руды // Физ.-техн. проблемы разработки полезн. ископ. 1975. № 5. С. 29-45.
2. Чирков С.Е. Зависимость прочности горных пород при сдвиге от вида напряженного состояния // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 4. С. 39-40.
3. Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютин Н.С. Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород. 2-е изд. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2019. 132с
4. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении // Прикладная математика и механика. 1965. Т. 29. Вып. 4. С. 681-689.
5. ГОСТ 21153.3–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Изд-во стандартов. 1988. 16 с.