

Методические и методологические составляющие процедуры прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-8-96-100>

ЦЮПА Д.А.

Горный инженер, соискатель кафедры
«Строительство подземных
сооружений и горных предприятий»
Горного института НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: sps@misis.ru

В области проведения геомеханических расчетов предлагается использовать модели с так называемым двойным упрочнением, построенные на реализации процедур конечно-элементной аппроксимации и анализа. Их предпочтительность по сравнению с модельным представлением Кулона-Мора обусловлена более точными результатами совпадения конечных результирующих данных математического моделирования по сравнению с экспериментальными опытными данными. Использование вышеописанных составляющих при реализации алгоритмического подхода данного модельного представления позволяет правомерно интерпретировать картину складывающейся геомеханической обстановки. Эта интерпретация связана с возникновением и формированием зон упрочнения на основе изотропного сжатия, что является следствием комплексного проявления процессов в ее контуре от изотропного сдвига и сжатия при их одновременных проявлениях. Наличие данных фрагментов дает возможность определить количественные величины и проследить характер распределения пластических деформаций, а также размер этой зоны.

Ключевые слова: геомеханические ситуации, математическое моделирование, упругое пластическое деформирование, тоннельные сооружения, метод конечных элементов, технологии подземного строительства.

Для цитирования: Цюпа Д.А. Методические и методологические составляющие процедуры прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ // Уголь. 2023. № 8. С. 96-100. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-96-100.

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятой точкой зрения является утверждение, что руководствуясь основными положениями Градостроительного кодекса РФ все подземные сооружения в соответствии с функциональным назначением относятся к серии особо опасных, так как обладают довольно сложной технической и технологической иерархическими структурами с определенными энтропийными и эмерджентными свойствами. Процесс их функционирования в силу объективных и субъективных причин различного рода всегда связан с проявлением нештатных ситуаций, ассоциированных с авариями, на устранение негативных последствий которых требуются довольно значительные финансовые, материальные и людские ресурсы и временные лаги.

Модельное представление поведения грунта Hardening Soil основано на использовании таких составляющих, как: угол дилатансии ψ , угол внутреннего трения ϕ , угол сцепления c , которые являются базисными составляющими для процедуры описания предельного напряженного состояния инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Входными параметрами для описания жесткости грунтового массива являются: составляющая жесткости, полученная при проведении испытаний с использованием одометра E_{oed} , составляющая жесткости, полученная при проведении испытаний при разгрузке E_{ur} , составляющая жесткости, полученная при проведении испытаний с использованием трехосного сжатия при 50% прочности E_{50} .

Основным преимуществом и отличительной особенностью модельного представления поведения грунта Hardening Soil в сопоставлении с модельным линейным представлением разрушения Кулона-Мора является составляющая ввода в алгоритмическое обеспечение проведения расчетов упругопластических представлений и нелинейной зависимости составляющей модуля жесткости от возникающих тензоров напряжений, что позволяет интерпретировать процедуру увеличения жесткости системы с увеличением интенсивности нагружения (повышением давления). Более того, упругопластическая модель с упрочнением грунта Hardening Soil учитывает нелинейное поведение грунта под нагрузкой, а также наиболее полно отражает действительное поведение грунтов при разгрузке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Прирастание деформаций в рамках данного модельного представления формируется и визуально отслеживается с использованием следующего алгоритма. В ходе проведения расчетов на каждом определенном этапе сфера деформаций соответствует размеру возникающих нагрузочных напряжений – в этой ситуации, при наличии узлов сетки конечных элементов во внутрисферичном пространстве, они характеризуются перемещениями, позволяющими им радиально попасть в граничную область заданной сферы. Данный процесс в рамках разных исследований носит обобщенное название «перетягивание узлов», схематичное изложение его протекания представлено на рис. 1.

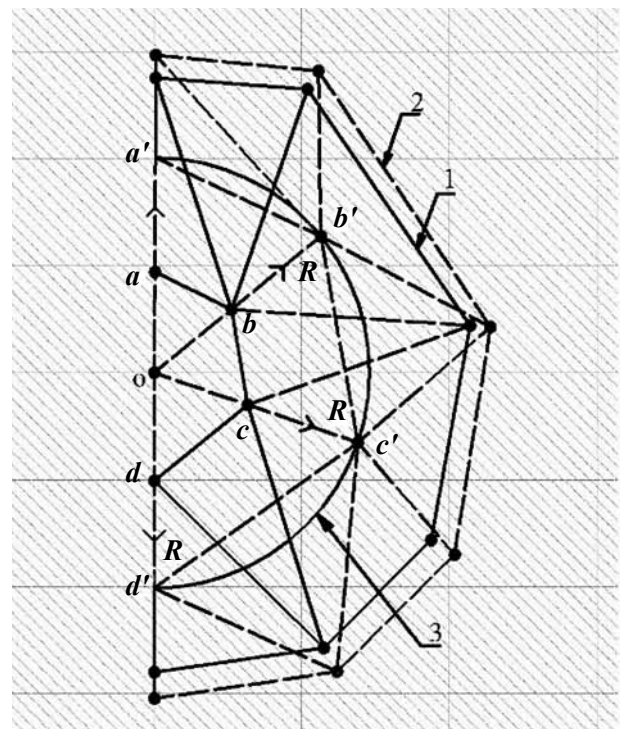


Рис. 1. Процедура «перетягивания узлов» сгенерированной сетки конечных элементов в граничную область сферы: 1 – исходная сетка, 2 – конечная сетка, 3 – исходная граница сферы (контур выработки)

Fig. 1. Procedure of «pulling nodes» of the generated finite element mesh into the sphere boundary area: 1 – initial mesh, 2 – resulting mesh, 3 – initial sphere boundary (excavation boundaries)

В численном представлении это отображается с помощью реализации процедуры задания функции поверхности сферы с проверкой условия обязательного попадания узлов внутрь поверхности. Визуально это можно представить следующим графиком (рис. 2).

Выбор и обоснование конкретных методических и методологических составляющих процедур прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ с учетом действующей инфраструктуры требуют решения ряда взаимосвязанных задач и реализации управления с учетом

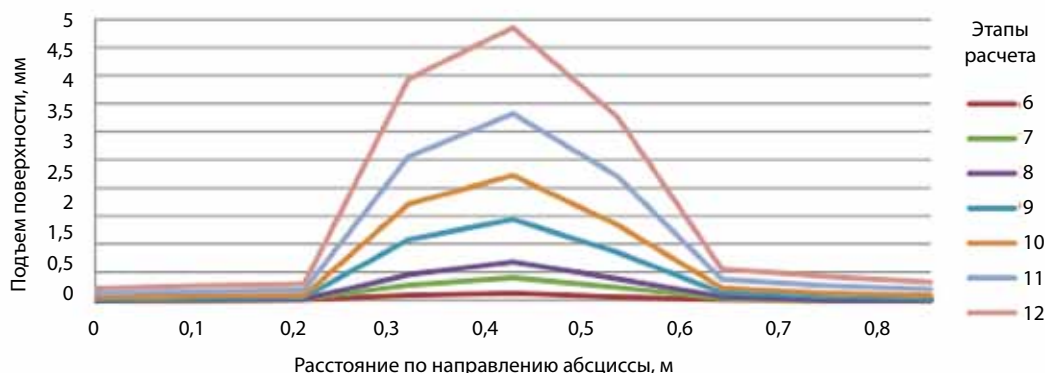


Рис. 2. Нарастание оболочек деформаций при реализации процедуры «перетягивания узлов»

Fig. 2. Accumulation of deformation envelopes when implementing the «pulling nodes» procedure

обязательной корректировки определенных технологических параметров с целью стабилизации НДС вмещающего грунтового массива, что предопределяет рассмотрение отдельных составляющих различных методических подходов и теорий, сформировавшихся в заявленной проблематичной области.

В первую очередь, требуется рассмотрение конечного элемента и его функциональных свойств с учетом научных подходов теории упругости [1, 2].

Согласно научным подходам теории упругости x и y (точки напряженной области) сегментируются на треугольные конечные элементы в рамках непрерывных функций координат u и v , которые аппроксимируются линейными полиномами (рис. 3):

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2x + a_3y, \\ v &= a_4 + a_5x + a_6y, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_1, \dots, a_6 – константы.

Далее в линейные полиномы вводятся узловые координаты, и с учетом их шести компонентов перемещений они трансформируются в вид:

$$\{\delta\} = [A] \{a\},$$

где $\{\delta\} = \{u_i, u_j, u_k, v_i, v_j, v_k\}$,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Вычленив из трансформированного вида линейных полиномов вектор $\{a\}$, с учетом узловых перемещений получим:

$$\{a\} = [A]^{-1} \{\delta\}. \quad (3)$$

После определения констант a в уравнении (3) получим:

$$\begin{aligned} u &= N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k, \\ v &= N_i v_i + N_j v_j + N_k v_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где N_i, N_j, N_k – обобщающие функции формы.

Относительные деформации в рамках данного подхода будут равны:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= du/dx = N'_{ix} u_i + N'_{yx} u_y + N'_{kx} u_k, \\ \varepsilon_y &= dv/dy = N'_{iy} v_i + N'_{jy} v_j + N'_{ky} v_k, \\ \gamma_{xy} &= du/dy + dv/dx = N'_{iy} u_i + N'_{ij} u_j + \\ &+ N'_{ky} u_k + N'_{ix} v_i + N'_{jx} v_j + N'_{kx} v_k. \end{aligned}$$

Матричная форма их представления:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}, \quad (5)$$

где $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$,

$$[B] = \begin{pmatrix} N'_{ix} & N'_{yx} & N'_{kx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N'_{iy} & N'_{jy} & N'_{ky} \\ N'_{iy} & N'_{jy} & N'_{ky} & N'_{ix} & N'_{yx} & N'_{kx} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

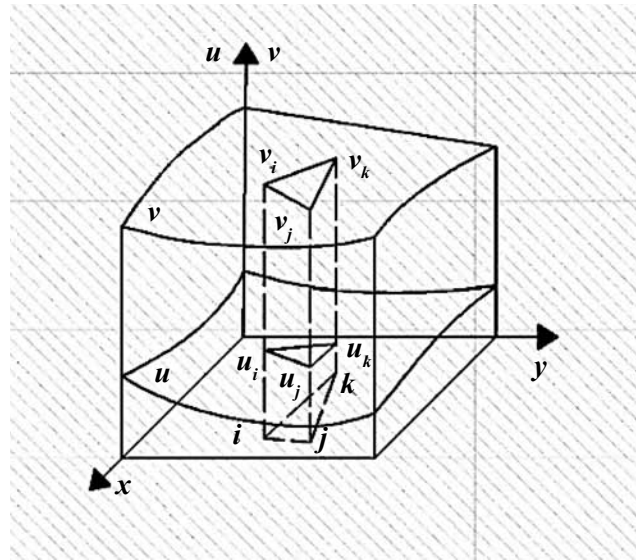


Рис. 3. Процедура аппроксимации функций перемещения
Fig. 3. Approximation procedure of displacement functions

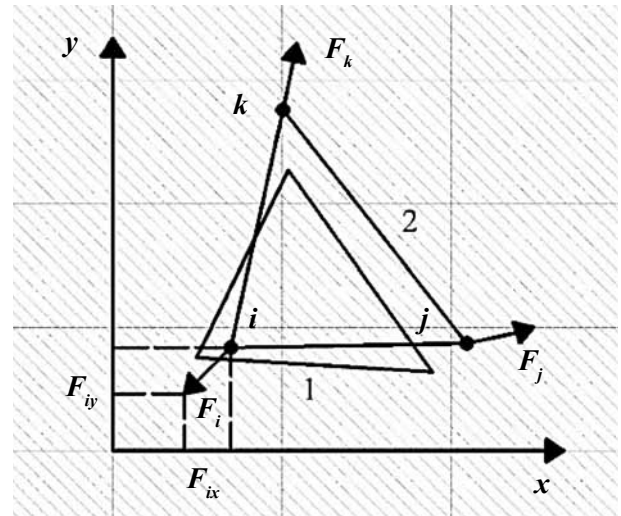


Рис. 4. Составляющие картины деформирования конечного элемента
Fig. 4. Components of the finite element deformation pattern

Проведя процедуру их дифференцирования, можно получить значения производных, представляющих функции формы:

$$N'_{ix} = (1/2\Delta)b_i, \quad N'_{iy} = (1/2\Delta)c_i. \quad (7)$$

Не отступая от общепринятых научных подходов в области гипотез формирования напряжений (закон Гука) [3, 4], можно записать:

$$[v] = [D] \{v\} = [D] [B] \{\delta\}. \quad (8)$$

Деформирование конечного элемента всегда происходит с проявлением формоизменения посредством проявлений узловых сил F_i, F_j и F_k (рис. 4).

Исходная отправная точка пространственного положения $d\delta$ узла i с учетом полного вектора перемещений определяется:

$$\{d\delta\} = \{d\delta \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T = d\delta \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T. \quad (9)$$

С учетом непосредственного влияния силы F_{ix} $A_k = d\delta F_{ix}$ количественное значение деформаций:

$$\{d\delta\} = [B] \{\delta\}. \quad (10)$$

Потенциальную работу внутренних напряжений с учетом предыдущих формул можно представить в виде:

$$A_{\text{вн}} = d\delta \int_S \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\} [B]^T [D] [B] \{\delta\} dS, \quad (11)$$

Трансформируя отдельные составляющие A_k , $A_{\text{вн}}$ и $d\delta$, получим:

$$F_{ix} = \int_S \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\} [B]^T [D] [B] \sigma, \quad (12)$$

Обобщенный вид матричного уравнения:

$$\{F\} = [K] \{\delta\}, \quad (13)$$

где $[K] = \int_S [B]^T [D] [B] dS$ – целевая функция искомой матрицы жесткости КЭ. (14)

Далее происходит формирование внутренней структуры матрицы жесткости системы (МЖС) с учетом системы линейных уравнений, узловых перемещений и сил:

$$[K^c] \{\delta^c\} = \{F^c\}. \quad (15)$$

Последующие преобразования приводят к виду:

$$A\delta_i + \Sigma(k_{ij} \delta_j) = DA, \quad (j \geq i + 1), \quad (16)$$

где величина $\Sigma(k_{ij} \delta_j)$ – сумма произведений недиагональных членов i -й строки МЖС на перемещения δ_j .

Решение системы уравнений в этих условиях сводится к заданной величине D .

С учетом осуществления этой процедуры количественные величины узловых перемещений позволяют осуществить расчет деформаций и смещений в конкретных конечных элементах исследуемой области [5, 6, 7].

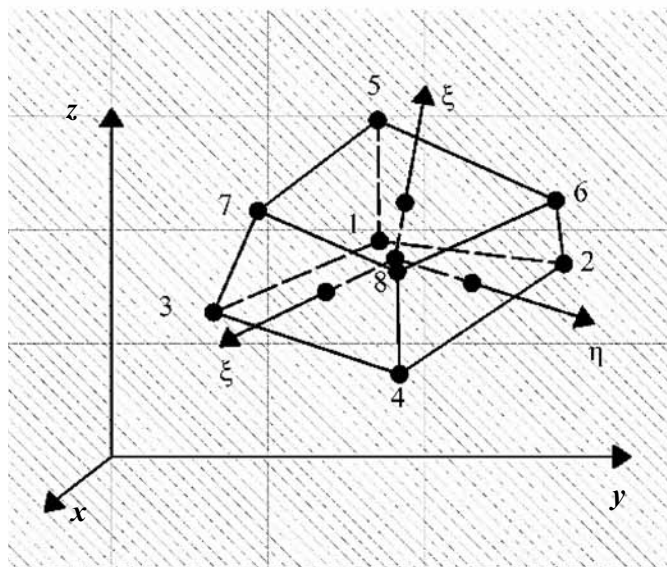


Рис. 5. Пространственная постановка задачи (использование гексаэдра)

Fig. 5. Spatial formulation of the problem (using a hexahedron)

Пространственная постановка задачи требует использования гексаэдра (рис. 5).

Формулы для определения функций перемещений:

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + \dots + N_8 u_8, \quad (17)$$

$$v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + \dots + N_8 v_8,$$

$$w = N_1 w_1 + N_2 w_2 + \dots + N_8 w_8.$$

Дифференцирование функций перемещений приводит к определению относительных деформаций:

$$\varepsilon_x = du/dx, \quad \varepsilon_y = dv/dy, \quad \varepsilon_z = dw/dz,$$

$$\gamma_{xy} = du/dy + dv/dx, \quad \gamma_{yz} = dv/dz + dw/dy,$$

$$\gamma_{zx} = du/dz + dw/dx, \quad (18)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\},$$

где $\{\varepsilon\} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_8 \ v_8 \ w_8\}^T$.

Опуская промежуточные преобразования, формализация данного выражения с учетом закона Гука выглядит следующим образом:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] [B] \{\delta\}. \quad (19)$$

Узловые силы связаны с узловыми перемещениями интегрированием величины $\{d\varepsilon\}^T \{\sigma\}$ по объему элемента:

$$\{F\} = [K] \{\delta\}, \quad (20)$$

где $[K]$ – сформированная и используемая матрица жесткости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ концептуальных научных подходов в области оценки, прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива показал, что в настоящий период развития научно-технического прогресса в секторе реализации подземных строительных технологий для сооружения различного типа подземных конструкций и горнотехнических систем в рамках решения комплекса сопутствующих геомеханических задач приоритетное использование получил метод конечных элементов, основанный на основополагающих принципах, методических и методологических особенностях теории механики сплошной среды.

Выбор и обоснование конкретных методических и методологических составляющих процедур прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ с учетом действующих инфраструктур требуют решения ряда взаимосвязанных задач и реализации управления. В разряд приоритетных и актуальных задач численного моделирования выходит задача выбора как конкретного вида геомеханической модели, так и ее входных параметров (исходной информации моделирования). Это объясняется наличием множества модификаций геомеханической модели и довольно сложным математическим аппаратом проведения расчетов, что предопределяет значительную вероятность получения ошибочных результатов. Это касается моделей модификаций E (закон Гука), HS (Hardening-Soil), MC (Кулона-Мора), HSs (Hardening-Soil Small). Возникает вопрос сходимости результатов представленных

модификаций и обоснованного выбора последней (программные комплексы Abaqus, Plaxis ZSoil, Midas и др.). Исходя из решаемой задачи, связанной с вопросами снятия нагрузки, модельные представления (Creep Model и Soft-Soil) рекомендуется не использоваться в рамках проведения сопутствующих расчетов.

Список литературы

1. Лебедев М.О., Романевич К.В. Определение напряженного состояния обделки при реконструкции транспортных тоннелей // Геотехника. 2019. Т. 11. № 4. С. 42-55.
2. Фомченкова Д.И. Строительство станций метрополитена колонного типа глубокого заложения в условиях стесненной городской среды // Актуальные исследования. 2022. С. 43.
3. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена и притоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки / И.Я. Харченко, Е.А. Пестрякова, А.А. Пискунов и др. // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 3. С. 31.
4. Матюхова О.С., Манько А.В. Методика применения одномерных и двумерных элементов при математическом моделировании обделки тоннеля метрополитена // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. С. 440-450.
5. A creep model for frozen sand of Qinghai-Tibet based on Nishihara model / Z.Y. Zhu, F. Luo, Y.Z. Zhang et al. // Cold Regions Science and Technology. 2019. Vol. 167. P. 102843.
6. Zhou J., Zhao W., Tang Y. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment // Tunneling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 107. 103647.
7. Козлов В.В., Агафонов В.В. Обоснование метода математического моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Уголь. 2017. № 3. С. 70-71. URL: <http://www.ugolinfo.ru/Free/032017pdf> (дата обращения: 15.07.2023).

Original Paper

UDC 622.013.3 © D.A. Tsyupa, 2023

ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 8, pp. 96-100

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-8-96-100>

Title

METHODICAL AND METHODOLOGICAL COMPONENTS OF THE PROCEDURE FOR PREDICTIVE ASSESSMENT OF DEFORMATIONS AND DISPLACEMENTS IN THE FIELD OF INTERRELATED INFLUENCE OF UNDERGROUND MINING OPERATIONS

Authors

Tsyupa D.A.¹

¹ National Research University of Science and Technology (MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Authors Information

Tsyupa D.A., Mining engineer, Candidate of the Department «Construction of Underground Structures and Mining Enterprises» of the Mining Institute, e-mail: sps@misiz.

Annotation

In the field of geomechanical calculations, it is proposed to use models with the so-called double hardening, based on the implementation of finite element approximation and analysis procedures. Their preference in comparison with the Coulomb-Mohr model representation is due to more accurate results of the coincidence of the final resulting mathematical modeling data compared with experimental experimental data. The use of the above components in the implementation of the algorithmic approach of this model representation allows us to legitimately interpret the picture of the emerging geomechanical situation: this interpretation is associated with the emergence and formation of hardening zones based on isotropic compression, which is a consequence of the complex manifestation of processes in its contour from isotropic shear and compression with their simultaneous manifestations. The presence of these fragments makes it possible to determine quantitative values and trace the nature of the distribution of plastic deformations, as well as the size of this zone.

Keywords

Geomechanical situations, Mathematical modeling, Elastic plastic deformation, Tunnel structures, Finite element method, Underground construction technologies.

References

1. Lebedev M.O. & Romanevich K.V. Determination of the stress state of the lining during the reconstruction of transport tunnels. *Geotechnika*, 2019, Vol. 11, (4), pp. 42-55. (In Russ.).

2. Fomchenkova D.I. Construction of deep-laid column-type metro stations in a cramped urban environment. *Aktualnye issledovaniya*, 2022, pp. 43. (In Russ.).
3. Kharchenko I.Ya., Pestryakova E.A., Piskunov A.A. et al. Features of the design, construction and operation of subway tunnels and tunnel structures in conditions of dense urban development. *Transportnye sooruzheniya*, 2019, Vol. 6, (3), p. 31. (In Russ.).
4. Matyukhova O.S. & Manko A.V. Methods of using one-dimensional and two-dimensional elements in mathematical modeling of the lining of the subway tunnel. *Enzhinernyj vestnik Dona*, 2022, (7), pp. 440-450. (In Russ.).
5. Zhu Z.Y., Luo F., Zhang Y.Z., Zhang D.J. & He J.L. A creep model for frozen sand of Qinghai-Tibet based on Nishihara model. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, (167), 102843.
6. Zhou J., Zhao W. & Tang Y. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2021, (107), 103647.
7. Kozlov V.V. & Agafonov V.V. Mathematic modeling method validation for rock mass stressed-strained state computation. *Ugol'*, 2017, (3), pp. 70-71. Available at: <http://www.ugolinfo.ru/Free/032017pdf> (accessed 15.07.2023). (In Russ.).

For citation

Tsyupa D.A. Methodical and methodological components of the procedure for predictive assessment of deformations and displacements in the field of interrelated influence of underground mining operations. *Ugol'*, 2023, (8), pp. 96-100. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-96-100.

Paper info

Received July 1, 2023

Reviewed July 14, 2023

Accepted July 26, 2023

GEOTECHNOLOGY