



## РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.6:622.27

<https://doi.org/10.31713/vt420186>

Калініченко О. В., к.е.н., доцент (Криворізький національний університет)

### ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ І ЗАКЛАДЦІ ОЧИСНИХ КАМЕР ПЕРШОЇ ЧЕРГИ ТВЕРДІЮЧОЮ ЗАКЛАДКОЮ

Встановлено, що дослідження та розробка теоретичних основ впливу штучного поля напружень на розвиток геомеханічних процесів при виїмці корисної копалини камерними системами розробки із закладкою виробленого простору є досить складним детермінованим процесом. Тому діагностування і облік силових взаємодій і трансформацій штучного поля напружень і його вплив на досліджуваній ділянці родовища виконувалося з урахуванням наявності етапного характеру навантаження гірських порід. Кількість розрахункових етапів прийнято тотожним кількості технологічних циклів відпрацювання шахтного поля. З урахуванням прийнятих критеріїв, з метою отримання необхідних чисельних значень, дослідження напружено-деформованого стану масиву було розбито на етапи, прив'язані до технологічних циклів відпрацювання покладів. Дана методика тотожна розрахунковому методу «послідовних циклів», який застосовувався для аналітичних досліджень. У виконаних дослідженнях, технологічні етапи розглядалися як процес перерозподілу напружень між гірським масивом, закладкою і обваленими пустими породами, при цьому навантаження в кожному наступному етапному циклі визначалося з урахуванням попереднього технологічного циклу. Розрахунок адекватних напружень і деформацій здійснювався на базі програмного комплексу Ansys 16.2.

**Ключові слова:** підземна розробка, камерні системи, закладка, комп'ютерне моделювання, напруження, деформації.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** При підземній розробці родовищ корисних копалин дослідження та розробка теоретичних основ впливу штучного поля напружень на розвиток геомеханічних процесів при виїмці корисної копалини камерними системами розробки із закладкою виробленого простору є

досить складним детермінованим процесом. Тому діагностування і облік силових взаємодій і трансформацій штучного поля напружень і його вплив на досліджуваній ділянці родовища доцільно виконувати з урахуванням наявності етапного характеру навантаження гірських порід застосовуючи сучасні математичні методи та програми комп'ютерного моделювання.

**Постановка завдання.** Чисельні методи моделювання, що враховують фізико-механічні властивості неоднорідних гірських масивів, вимагають значних потужностей для вирішення завдань високої обчислювальної складності. Цей факт обумовлює ефективність застосування сучасної комп'ютерної техніки для вирішення завдань дослідження, моніторингу та прогнозування напружено-деформованого стану гірського масиву при видобутку залізної руди підземним способом.

У даний час існує значна кількість прикладних програм, які дозволяють визначити напружено-деформований стан гірського масиву. До таких програм можна віднести «SolidWorks», «Ліра», «Ansys», «GTSNX», «SCAD» і ряд інших. Дані програмні комплекси дозволяють досліджувати гірський масив, як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовища.

У даній роботі розрахунок напружень і деформацій виконувався за допомогою програм Ansys 16.2 [1-7].

Таким чином, метою даної роботи є дослідження напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні і закладці очисних камер першої черги твердіючою закладкою за допомогою метода чисельного моделювання із застосуванням спеціалізованих комп'ютерних програм.

**Викладення матеріалу та результати.** Технологія відпрацювання рудних покладів камерними системами розробки з закладкою виробленого простору полягає в відпрацюванні камер першої черги, закладки камер твердіючою закладкою та наступним відпрацюванням камер другої черги. Іноді відпрацювання ділянки рудного покладу може здійснюватися шляхом поділу родовища на камери першої, другої, третьої черги, іноді і більше.

На рис. 1-5 представлена кореспондуюча динаміка трансформації напружено-деформованого стану масиву при відповідному етапному розвитку очисних робіт на ділянці, що діагностується.

На рис. 1 представлені відповідні ізолінії головних напружень та результати розрахунку деформацій денної поверхні і гірського масиву в контрольних точках ділянки шахтного поля при виїмці камери

першої черги на початковому етапі відпрацювання родовища.

Дані розрахунки відповідають першому етапного циклу.

Спостерігається класичний розподіл головних напружень  $\sigma_1$  з концентрацією стискаючих напружень в кутах камер і появою розтягуючих напружень в стелині, в центральній частині на кордоні з оголеною поверхнею.

Зареєстровані відповідні деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованого блоку і на контакті з стелиною відпрацьованої камери першої черги.

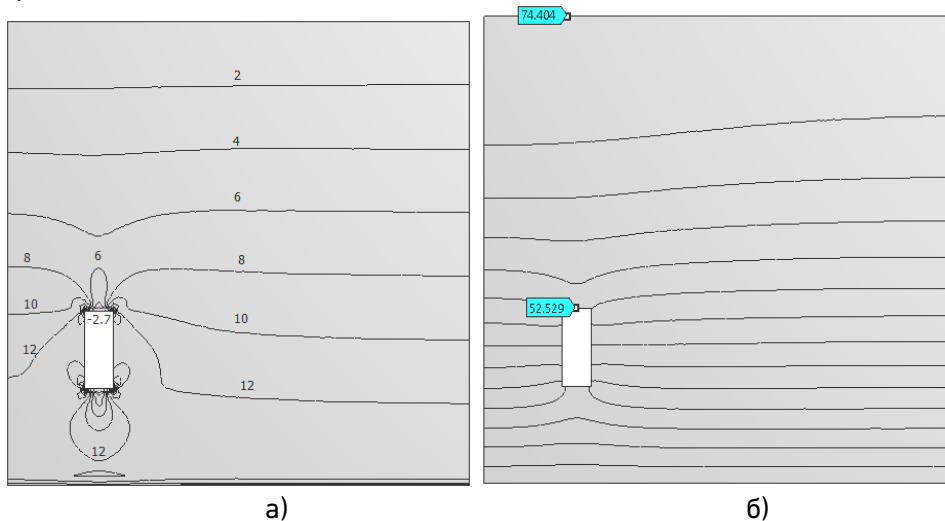


Рис. 1. Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при виїмці камери першої черги

На рис. 2 представлені відповідні ізолінії головних напружень та результати розрахунку деформацій денної поверхні і гірського масиву в контрольних точках шахтного поля при виїмці другої камери першої черги і закладці першої камери твердіючою закладкою.

Характер розподілу головних напружень  $\sigma_1$  з концентрацією стискаючих напружень в кутах камер і появою розтягуючих напружень в стелинах очисного простору і міжкамерних ціликах є класичним і корелює з попереднім варіантом, варіюючи в абсолютних величинах.

Однак абсолютна величина максимальних напружень знижується при заповненні очисного простору першої відпрацьованої камери твердіючою закладкою.

Загальна кореспондуюча величина деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором

відпрацьованого блоку і на контакті з стелиною відпрацьованої камери першої черги збільшується.

Варіація відповідних величин деформації в контрольних точках гірського масиву становить 3-5%.

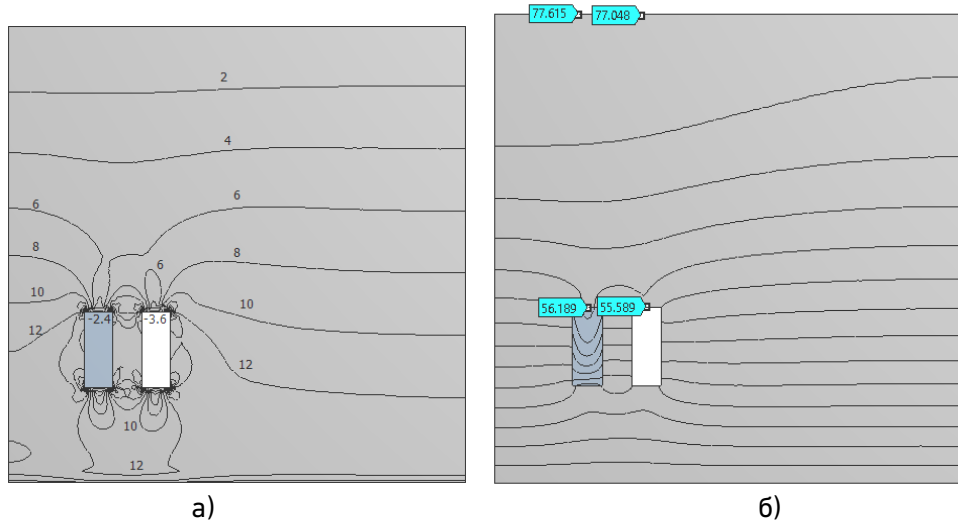


Рис. 2. Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при виїмці другої камери першої черги і закладці першої камери твердіючою закладкою

На рис. 3 представлені ізолінії головних напружень та результати розрахунку деформацій денної поверхні і гірського масиву в контрольних точках дослідної ділянки шахтного поля при виїмці третьої камери першої черги і закладці другої камери твердіючою закладкою.

Характер розподілу головних напружень  $\sigma_1$  з концентрацією стискаючих напружень в кутах камер і появою розтягуючих напружень в стелинах очисного простору і міжкамерних ціликах є аналогічною до попереднього варіанту, варіюючи в абсолютних величинах.

Абсолютна величина максимальних напружень також знижується при заповненні очисного простору другої відпрацьованої камери твердіючою закладкою.

Загальна величина деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованого блоку і на контакті з стелиною відпрацьованої камери першої черги збільшується.

Варіація відповідних величин деформації в контрольних точках гірського масиву дещо збільшується.

На рис. 4 представлена відповідна динаміка трансформації на-

пружено-деформованого стану масиву при заключному етапі розвитку очисних робіт на діагностуємії ділянці, а саме при виїмці і закладці заключної камери першої черги твердіючою закладкою.

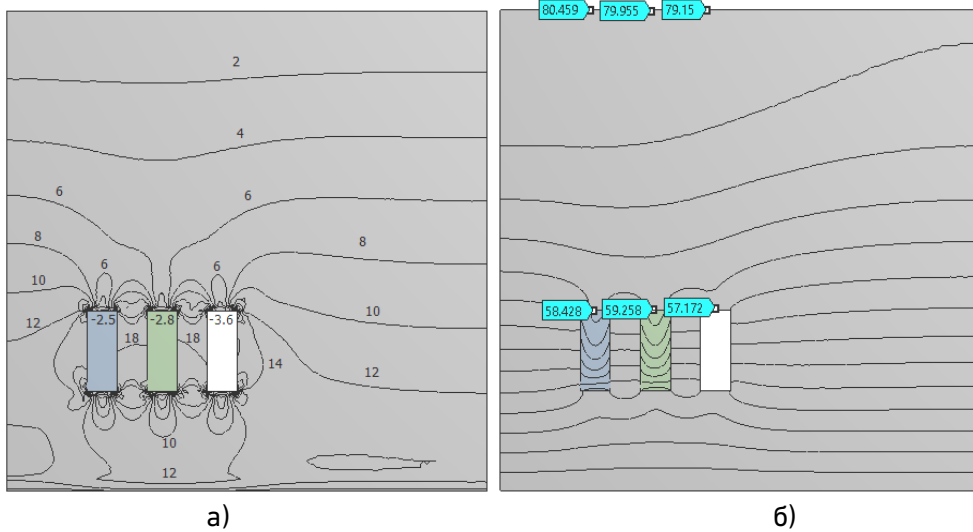


Рис. 3. Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при виїмці третьої камери першої черги і закладці другої камери твердіючою закладкою

Наведено ізолінії головних напружень та результати розрахунку деформацій денної поверхні і гірського масиву в контрольних точках шахтного поля.

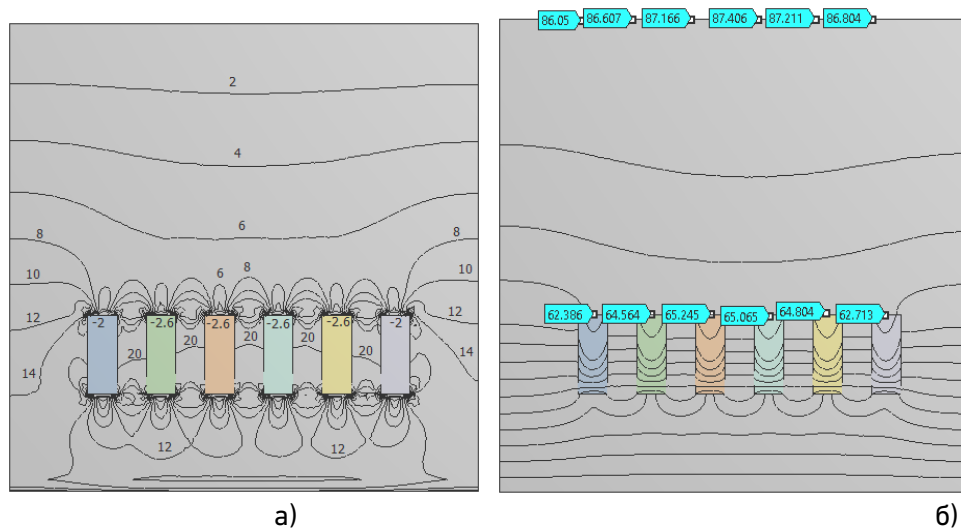


Рис. 4. Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при виїмці і закладці заключної камери першої черги твердіючою закладкою

Принциповою закономірністю є збільшення деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контактi з стелиною відпрацьованих і закладених камер першої черги.

Варіація відповідних величин деформацій в контрольних точках гірського масиву досягає 12-14%.

Аналогічні дослідження динаміки трансформації напружено-деформованого стану гірського масиву проведені для умов повної виїмки камер першої черги без подальшої закладки виробленого простору.

Діагностовані величини дозволили встановити ключові закономірності деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контактi з стелиною відпрацьованих камер першої черги.

Варіація відповідних величин деформацій в контрольних точках гірського масиву досягає 18-21%.

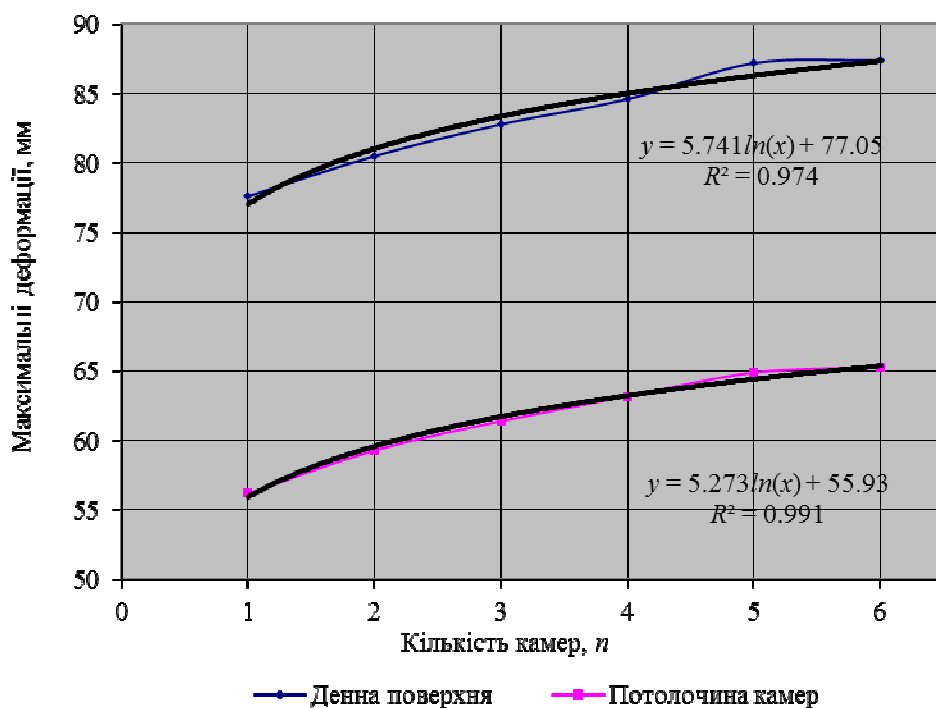


Рис. 5. Графіки залежності максимальних вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні і на контактi з стелиною відпрацьованих камер першої черги, заповнених твердіючою закладкою



Кореспондуючі графіки встановлених залежностей максимальних вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контакті з стелиною відпрацьованих камер першої черги, заповнених твердіючою закладкою, представлені на рис. 5.

Аналіз розрахункових значень залежності величини максимальних вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контакті з стелиною відпрацьованих камер першої черги, заповнених твердіючою закладкою дозволив отримати наступні залежності.

Вертикальні деформації структурно неоднорідного масиву залежать від кількості відпрацьованих і закладених камер першої черги.

Величина вертикальних деформацій денної поверхні добре апроксимуються логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = 5,742 \ln(n) + 77,054, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – величина максимальних вертикальних зсувів денної поверхні, мм;

$n$  – кількість відпрацьованих і закладених камер першої черги.

Величина вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву над очисним простором відпрацьованих блоків добре апроксимуються логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = 5,273 \ln(n) + 55,934. \quad (2)$$

Ці рівняння дозволяють визначати величину максимальних вертикальних зсувів денної поверхні і контурів стелин відпрацьованих камер першої черги при формуванні твердіючого штучного закладного масиву в очисних камерах.

### **Висновки**

Встановлена кореляційна залежність дозволяє говорити про досить вагомий вплив твердіючої закладки на стійкість геотехнічної системи «гірський масив-штучний масив твердіючої закладки».

Відносне збільшення величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні при інтенсифікації відпрацювання ділянки шахтного поля з однієї до шести камер першої черги становить не більше 10-11%. В абсолютних величинах вертикальні деформації денної поверхні не перевищують 9-10 мм.

Такі величини є допустимими і не роблять істотного впливу на напружено-деформований стан структурно неоднорідного масиву.

1. Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / М. І. Ступнік, В. О. Калініченко, І. О. Музика, О. В. Калініченко, М. Б. Федько, С. В. Письменний. *Розробка родовищ 2015* : щорічний наук.-техн. зб. Дніпропетровськ : Літограф, 2015. С. 175–181. 2. The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine “Gigant-Gliboka” of central iron ore enrichment works (CGOK) / N. Stupnik, V. Kalinichenko, E. Kalinichenko, I. Muzika, M. Fed'ko, S. Pis'menniy. *Metallurgical and mining industry*. 2015. No. 7. P. 377–382. 3. Панжин А. А., Панжина Н. А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях. *Горный информ.-аналит. бюл.* 2007. № 3. С. 171–183. 4. Сашурин А. Д., Панжин А. А., Коновалова Ю. П. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий. *Горный информ.-аналит. бюл.* 2003. № 7. С. 34–38. 5. Сашурин А. Д., Беликов В. Е. Проблемы устойчивости подземных и наземных сооружений в зоне тектонических нарушений. *Вопросы осушения, горнопромышленной геологии и охраны недр* : материалы международного симпозиума. Белгород : ВИОГЕМ, 2003. С. 206–216. 6. Сашурин А. Д. Диагностика геодинамической активности участков размещения объектов недропользования для снижения риска природно-техногенных катастроф. *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр* : сб. науч. трудов. Вып. 5 (95). ИГД УрО РАН. Екатеринбург : УрО РАН, 2009. С. 419–428. 7. Розробка інформатизованих систем моніторингу і керування процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні відкритих гірничих виробок і штучних підземних споруд : звіт з НДР, 0114U003776с. Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ»–«НГУ», 2015. 117 с.

## REFERENCES:

1. Informatsiini tekhnolohii – skladova protsesiv monitorynhu ta keruvannia napruzhenno-deformovanym stanom masyvu / M. I. Stupnik, V. O. Kalinichenko, I. O. Muzyka, O. V. Kalinichenko, M. B. Fedko, S. V. Pysmennyi. *Rozrobka rodovyshch 2015* : shchorichnyi nauk.-tekhn. zb. Dnipropetrovsk : Litohrad, 2015. S. 175–181. 2. The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine “Gigant-Gliboka” of central iron ore enrichment works (CGOK) / N. Stupnik, V. Kalinichenko, E. Kalinichenko, I. Muzika, M. Fedko, S. Pismenniy. *Metallurgical and mining industry*. 2015. No. 7. P. 377–382. 3. Panzhin A. A., Panzhina N. A. Monitorinh heodinamicheskikh protsessov na hornykh predpriatiiakh i urbanizirovannykh territoriiakh. *Hornyi inform.-analit. biul.* 2007. № 3. S. 171–183. 4. Sashurin A. D., Panzhin A. A., Konovalova Yu. P. Issledovanie heodinamicheskikh protsessov s primeneniem GPS-tekhnologii. *Hornyi inform.-analit. biul.* 2003. № 7. S. 34–38. 5. Sashurin A. D., Belikov V. E. Problemy ustoichivosti podzemnykh i nazemnykh cooruzhenii v zone tektonicheskikh narushenii. *Voprosy osusheniia, hornopromyshlennoi heolohii i okhrany nedr* : materialy mezhdunarodnoho simpoziuma. Belhorod : VYOHEM, 2003. S. 206–216. 6. Sashurin A. D. Diahnostika heodinamicheskoi aktivnosti uchastkov razmeshcheniia obektov nedropolzovaniia dlia snizheniia





riska prirodno-tekhnohennykh katastrof. *Heotekhnolohicheskie problemy kompleksnoho osvoeniia nedr* : sb. nauch. trudov. Vyp. 5 (95). YHD UrO RAN. Ekaterinburh : UrO RAN, 2009. S. 419–428. 7. Rozrobka informatyzovanykh system monitorynhu i keruvannia protsesamy vzaiemodii poliv napruzhenodeformovanoho stanu masyvu pry formuvanni vidkrytykh hirnychykh vyrobok i shtuchnykh pidzemnykh sporud : zvit z NDR, 0114U003776с. Kryvyi Rih : DVNZ «KNU»–«NHU», 2015. 117 s.

Рецензент: д.т.н., професор Маланчук З. Р. (НУВГП)

---

**Kalinichenko O. V., Candidate of Economics (Ph.D.), Associate Professor** (State Institution of Higher Education "Kryvyi Rih National University")

### **STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MASSIF WHEN MINING AND BACKFILLING I-STAGE STOPES WITH CONSOLIDATING BACKFILL**

**Study and development of theoretical foundations of impacts of artificial stress fields on geomechanical processes when mining useful minerals by room systems with backfilling are proved to be a complicated deterministic process. That is why diagnostics and account of force interactions and transformations of the artificial stress field and its impact on the deposit area under study were conducted considering the stage character of the rock load. The number of calculation stages is accepted to be equal to the number of technological cycles of mining the underground mine field. On the basis of the accepted criteria and to obtain necessary numerical values, the stress-strain state of the massif was studied by stages linked to technological cycles of mining. The given technique is identical to the method of "successive cycles" used for analytical investigations. In the study conducted, technological cycles were treated as the process of redistribution of stresses among the rock massif, backfill and caved waste rocks. Loads in every next stage cycle were determined considering the previous technological cycle. Stresses and strains were calculated on the basis of Ansys 16.2. The diagonal values allowed to establish the key patterns of deformation at the control points of the rock massif on the surface of the surface over the clearing space of the spent blocks and on contact with the ceiling of the waste chambers of the first stage. The established correlation dependence allows us to speak about the rather significant influence of the hardening tab on the stability of the geotechnical system "mountain array-artificial array of hardening bookmarks".**

**A relative increase in the value of maximum vertical deformations of**

**the surface of the surface during the intensification of the development of a mine field from one to six chambers of the first stage is not more than 10-11%. In absolute values, the vertical deformations of the surface of the surface do not exceed 9-10 mm. Such quantities are permissible and do not significantly affect the stress-deformed state of a structurally heterogeneous array.**

**Keywords:** underground mining, room systems, backfilling, computer-aided simulation, stresses, strains.

---

**Калиниченко Е. В., к.э.н., доцент** (Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет")

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ И ЗАКЛАДКЕ ОЧИСТНЫХ КАМЕР ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ**

Установлено, что исследования и разработка теоретических основ влияния искусственного поля напряжений на развитие геомеханических процессов при выемке полезного ископаемого камерными системами разработки с закладкой выработанного пространства являются достаточно сложным детерминированным процессом. Поэтому диагностирование и учет силовых взаимодействий и трансформаций искусственного поля напряжений и его влияние на исследуемом участке месторождения выполнялось с учетом наличия этапного характера нагрузки горных пород. Количество расчетных этапов принято тождественным количеству технологических циклов отработки шахтного поля. С учетом принятых критериев, с целью получения необходимых численных значений, исследования напряженно-деформированного состояния массива были разбиты на этапы, привязанные к технологическим циклам отработки залежей. Данная методика тождественна расчетному методу «последовательных циклов», который применялся для аналитических исследований. В выполненных исследованиях, технологические этапы рассматривались как процесс перераспределения напряжений между горным массивом, закладкой и обрушенными пустыми породами, при этом нагрузка в каждом следующем этапном цикле определялась с учетом предыдущего технологического цикла. Расчет адекватных напряжений и деформаций осуществлялся на базе программного комплекса Ansys 16.2.

**Ключевые слова:** подземная разработка, камерные системы, закладка, компьютерное моделирование, напряжения, деформации.

---