

УДК 622.28

I.A. Ковалевська, д-р техн. наук, проф.,  
 В.В. Фомичов, канд. техн. наук, доц.,  
 А.І. Скитенко, М.В. Снігур

Державний вищий навчальний заклад  
 „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ,  
 Україна, e-mail: fomichov@inbox.ru

## ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРУВАТОСТІ ТА КУТА ПАДІННЯ ГІРСЬКОГО МАСИВУ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ЗІ СТІЙКОСТІ ВІЙМКОВИХ ВИРОБОК

I.A. Kovalevska, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
 V.V. Fomichov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
 A.I. Skitenko, M.V. Snigur

State Higher Educational Institution "National Mining University",  
 Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: fomichov@inbox.ru

## INFLUENCE OF STRATIFICATION CHARACTERISTICS AND INCLINATION ANGLE OF ROCK MASSIF ON MINE WORKINGS STABILITY COMPUTATIONAL TEST RESULTS

**Мета.** Визначити характер зміни напружено-деформованого стану системи „гірський масив – кріплення“ під час зміни геометричних і механічних параметрів розрахункової моделі.

**Методика.** При проведенні конкретних обчислювальних експериментів одні й ті ж характеристики гірського масиву можуть бути описані різним чином. Шаруватість є макрохарактеристикою і повинна моделюватися з високим ступенем адекватності в окремих випадках. Виробка, як технологічний елемент, відноситься до групи тимчасових об'єктів, для яких собівартість підтримки повинна бути порівнянна з технологічної та фінансовою доцільністю. Отже, запас міцності такого елемента повинен бути мінімальний і достатній в рівній мірі. Такі показники, для реальної пластової виробки, можна досягати тільки при врахуванні геометрії порідних шарів і кута падіння пласта в розрахунковій моделі. Псевдошар з особливими деформаційними характеристиками використовують у розрахунках для моделювання умов контактів з силою тертя між „реальними“ шарами. Це дозволяє у разі виконання „жорсткого контакту“ моделювати взаємодію окремих елементів розрахункової моделі в умовах, наближених до реальних, і при цьому не виходити за рамки статичної рівноваги всієї системи.

**Результати.** Створена методика комплексного моделювання взаємного впливу шаруватості та кута падіння гірничого масиву з метою покращення кількісних та якісних показників розрахункової моделі, яку використовують для аналізу стійкості виїмкових виробок шахт Західного Донбасу. Отримані рекомендації по врахуванню різних характеристик дрібношаруватого гірського масиву при проведенні розрахунків методом кінцевих елементів.

**Наукова новизна.** Визначені підходи до вибору характеристик гірського масиву і кріплення виробки при їх моделюванні в обчислювальному експерименті. Показана величина впливу на отримуваний результат різних характеристик реального гірського масиву.

**Практична значимість.** Забезпечення вибору оптимальних показників охорони виробок на шахтах Західного Донбасу. Зниження собівартості вугілля за рахунок зменшення капіталовкладень у підтримку підготовчих виробок.

**Ключові слова:** *гірський масив, шаруватість, кут падіння, напружено-деформований стан, обчислювальний експеримент, виробка*

**Постановка проблеми.** Вибір оптимальних параметрів пластової виїмкової виробки, особливо на етапі її проектування, дозволяє в значній мірі знизити в майбутньому собівартість її підтримки і, відповідно, зменшити загальні витрати на видобуток вугілля. У даний час найбільш доступним способом визначення оптимальних параметрів такої виробки є обчислювальний експеримент на основі використання кінцево-різницевого чисельного методу. При цьому результати розрахунків повинні, у прийнятному ступені, відповідати реальному розподілу напружень і деформацій [1]. Виникає питання щодо вибору для реалізації в обчислювальній моделі тих характеристик реального об'єкту, вплив яких перевищує поріг точності, встановлений в обчислювальному експерименті.

**Мета.** Визначити характер зміни напружено-деформованого стану системи „гірський масив – кріплення“ під час зміни геометричних і механічних параметрів розрахункової моделі.

Залежно від умов постановки завдання, одні й ті ж властивості неоднорідності гірського масиву можуть у різній мірі впливати на точність одержуваних результатів. Тому при проведенні конкретних обчислювальних експериментів одні й ті ж характеристики гірського масиву можуть бути описані різним чином. Вибір варіанту опису окремих характеристик проводився на основі їх поділу за ступенем і якістю впливу на результат обчислювального експерименту. Зазвичай виділяють три групи показників (характеристик) елементів розрахункової моделі: макро-, міні- і змішані характеристики.

Макрохарактеристики – це набір показників, опис яких здійснюється явним чином з максимальною від-

повідністю реальним (натурним) показникам модельованого об'єкта. Вплив на результат розрахунку таких характеристик є максимальним. При моделюванні шаруватого масиву до макрохарактеристик, зазвичай, відносять геометрію породного шару та його основні механічні властивості (модуль пружності, межі міцності і т.д.). Невірний опис хоча б однієї макрохарактеристики завжди призводить до втрати адекватності розрахункової моделі.

Мікрохарактеристики – це набір показників, опис яких можливий неявним або „синтетичним“ способом. Такі показники не можуть значною мірою вплинути на одержуваний результат, проте вони можуть змістити область можливих рішень таким чином, що, у ряді випадків, одержувані рішення не будуть відповідати реальному стану фізичного об'єкта. До мікрохарактеристик відносять обводненість, геологічну неоднорідність породи.

Змішані характеристики – це набір показників, які при описі в розрахунковій моделі використовують підхід, що вибирається для мікрохарактеристик, а їх вплив на одержуваний результат порівняний з макрохарактеристиками. Прикладом змішаної характеристики слід вважати тріщинуватість.

Напружено-деформований стан гірського масиву навколо підземних виробок у значній мірі залежить від його структурної складності. Шаруватість є макрохарактеристикою і повинна моделюватися з високим ступенем адекватності у випадках, коли: по-перше, висота породних шарів порівнянна, у межах одного порядку, із загальною висотою розрахункової моделі; по-друге, механічні властивості порід, модельованих у розрахунковій моделі, відносяться до широкого діапазону значень; по-третє, межа породних шарів проходить через контур виробки або на відстані від нього у дві висоти виробки.

У всіх цих випадках шаруватість у значній мірі змінює розподіл напружень як навколо контуру виробки, так і в зонах, прилеглих до кордонів породних шарів. При цьому ступінь впливу на поля напружень для різних компонент системи може коливатися в межах від 10 до 270% [2].

Для наочності розглянемо епюри напружень, що представлені на рис. 1. Виконаємо візуальне порівняння. Обидві епюри отримані для однакових гірничо-геологічних умов, але для різної форми і площі поперечного перерізу пластової виробки.

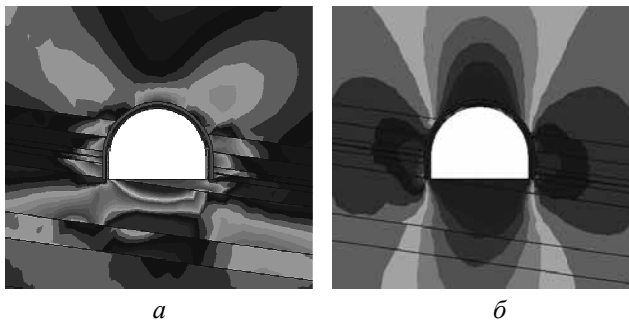


Рис. 1. Розподіл горизонтальних (а) і вертикальних (б) напружень у тонкошаровому масиві поблизу пластової виробки

Добре видно, що зміни в полі напружень в обох випадках значні не тільки навколо виробки, а й на поверхнях нашарування. Якщо породний шар перетинається площею поперечного перерізу виробки, зміна його НДС спостерігається на значній відстані від контуру виробки. При цьому, чим менше висота шару, тим значніше виявляються ці зміни. Вплив технічних характеристик кріплення зменшується зі збільшенням товщини породних шарів, що формують її кровлю. У принципі моделюванням шаруватості у верхній частині даної розрахункової області можна знехтувати.

Основна причина, завдяки якій вплив шаруватості настільки великий, у даній розрахунковій моделі, є різниця в міцності породних шарів. Породні шари, що утворюють підшву і боки виробки, володіють підвищеною жорсткістю по відношенню до породних шарів, що формують верхню і нижню області розрахункової моделі. Це призводить до концентрації напружень у межах геометричної області конкретного шару. При цьому слід враховувати, що подібний контраст у розподілі напружень пов'язаний з моделюванням не тільки шаруватості, але й складних умов контактів між породними шарами.

Шаруватість у розрахунковій моделі по-різному впливає на окремі компоненти напружень, навіть при вирішенні відносно простих задач. Для прикладу проаналізуємо вплив шаруватості на розподіл горизонтальних (рис. 1, а) і вертикальних (рис. 1, б) напружень, отриманих при оцінці стійкості одиночної пластової виробки [1]. Ізолінії на рис. 1, а мають яскраво виражений переривчастий характер. У місцях контакту між породними шарами спостерігається чергування зон градієнта напружень, у деяких областях зі зміною знака. Це вказує на те, що, у певних умовах при врахуванні шаруватості, внесок у руйнування порід, вплив горизонтальних напружень може значно перевершувати вплив вертикальних. Отже, гірський тиск не можна розглядати як лінійну функцію, прямо пропорційно залежну від ваги стовпа порід гірського масиву над склепінням виробки.

Зовсім по-іншому шаруватість впливає на розподіл у розрахунковій моделі вертикальних напружень (рис. 1, б). У представленій епюрі формування зон стискаючих і розтягуючих напружень практично не залежить від структури тонкошарового гірського масиву. Незначна зміна обрисів таких зон не призводить до зростання абсолютних значень напружень в їх межах, тобто можна говорити, що сумарна енергія деформацій і/або руйнувань не змінюється.

При врахуванні шаруватості постає питання щодо доцільності врахування кута падіння вугільного пласта для адекватності отриманих результатів. У більшості аналітичних і числових математичних рішень цим фактором нехтують, оскільки це дозволяє в значній мірі знизити складність скінчених математичних рівнянь і/або спростити розрахункову модель шляхом застосування рівнянь симетрії. При цьому часто наводять аргументи або засновані на окремих натурних спостереженнях, або на аналізі результатів аналогіч-

них обчислювальних експериментів. Тобто, штучно звужують область можливих рішень, керуючись приватним досвідом. Як правило, такі результати досліджень, за твердженням самих авторів, носять якісний характер і не можуть бути використані для кількісного аналізу стійкості підземних виробок. Подібний підхід при проектуванні й підтримці пластових виїмкових виробок не може себе виправдати. Оскільки виробки, як технологічний елемент, відносяться до групи тимчасових об'єктів, для яких собівартість підтримки повинна бути порівнянна з технологічною та фінансовою доцільністю. Отже, запас міцності такого елемента повинен бути мінімальний і достатній у рівній мірі.

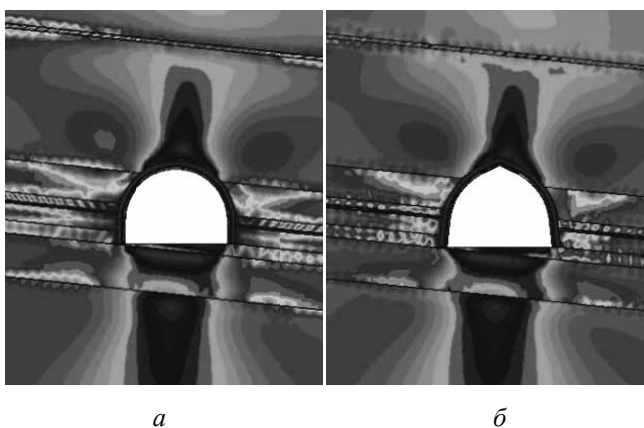


Рис. 2. Розподіл напружень у тонкошаровому масиві поблизу пластових виробок з різною формою поперечного перерізу: а) циркулярне; б) шатрове

Таких показників, для реальної пластової виробки, можна досягати тільки при врахуванні кута падіння пласта в розрахунковій моделі, якщо в натурних умовах величина цього кута складає більше  $3^\circ$  [2].

На підтвердження всього вищезазначеного проаналізуємо картину розподілу напружень на рис. 1 і рис. 2, а. Основна особливість цих епюр полягає у відсутності симетрії щодо вертикальної осі пластової виробки, тобто розподіл напружень у боках виробки має різний якісний і кількісний характер. Причому величина подібного дисбалансу залежить і від величини кута падіння, і від фізичних характеристик породних шарів. Для різних розрахункових моделей такий дисбаланс може становити до 40% у кількісних показниках і до 180% в якісних.

Тепер детальніше вивчимо особливості епюри інтенсивності напружень, наведеної на рис. 2, а. Чітко видно, у породному шарі, що утворює безпосередню покрівлю виробки, у зоні, що примикає до контуру виробки ліворуч, утворюється осередок підвищених стискаючих напружень. Праворуч такий осередок відсутній. Оскільки даний розрахунок був виконаний у пружній постановці, це дозволяє досліднику зробити висновок щодо підвищеного гірського тиску, що впливає на кріплення виробки в лівій верхній частині її контуру.

Іншою особливістю даної епюри є розподіл напружень у зоні, що примикає до підшови виробки. Оскільки породні шари, що утворюють підшову виробки, мають схожі фізичні характеристики, у процес здимання вони втягуються в рівній мірі. За рахунок моделюваного в розрахунках кута падіння в правій частині підшови виробки зона розтягувальних напружень більше, ніж у лівій. Отже, обсяг здимання в правій частині підшови виробки буде більше, а судячи з величини зони підвищених розтягувальних напружень, буде більше приблизно на 15%, ніж у лівій.

На рис. 1, а показано, якою значною мірою врахування кута падіння впливає на розподіл напружень у породних шарах, що безпосередньо прилягають до контуру пластової виробки. У наведеному випадку напруження в межах окремого породного шару змінюють не тільки величину, а й знак. Мова йде про породний шар, що прилягає до підшови виробки. Якщо права частина шару незначно навантажена, то в лівій спостерігається локальний градієнт практично у всьому діапазоні отриманих значень горизонтальних напружень. Це говорить про високу ймовірність руйнування даного породного шару в зоні опорного тиску лівого стояка кріплення виробки.

Як і шаруватість, кут падіння незначною мірою впливає на розподіл вертикальних напружень (рис. 1, б). У цьому випадку виникає лише незначне зміщення напружень уздовж поперечних осей породних шарів. Ступінь такого зміщення відносно невеликий при малому діапазоні фізичних характеристик порід і незначних, від  $3^\circ$  до  $7^\circ$ , кутах падіння вугільного пласта.

Крім того, що породні шари можуть мати різну геометрію та фізичні характеристики, у ході моделювання, для підвищення адекватності отриманих результатів, доводилося змінювати умови контактів на межах цих шарів. У загальному випадку можна виділити три типи таких контактів. Це жорсткий контакт, контакт із прослизанням і контакт з урахуванням сили тертя. Застосування того чи іншого типу контакту може призводити до якісних і кількісних змін картини розподілу напружень, представлених на рис. 2 і 3.

На епюрі напружень, представлених на рис. 2, добре видно як може впливати на загальну картину вибір контакту з урахуванням тертя для всіх меж літологічних різниць. Дані епюри містять ділянки, на яких чітко проглядається „мигтіння“ в полі напружень. Цей ефект викликаний особливостями чисельних методів, що застосовуються для визначення рівноважного стану розрахункової системи на контактах її окремих елементів. Цей ефект має жорстко локалізовані зони виникнення. Ці зони повністю збігаються з кінцевими елементами, окремі вузли яких належать контактуючій поверхні.

Виникнення цього ефекту пов'язано з неможливістю „плавного“ розподілу внутрішніх напружень скінчених елементів при певній комбінації величини сили тертя, жорсткості контактуючих породних шарів і величини прикладеного зовнішнього навантаження. Прояв цього ефекту, у більшості випадків, говорить про те, що у сформованих умовах розрахункова об-

ласть знаходиться на грані переходу з умови статичної рівноваги до умов динамічного стану.

Якщо товщина шару в розрахунковій моделі щодо ширини самої моделі величина менша на порядок і більше, тоді в це явище залучається весь його матеріал. Цю особливість часто використовують у розрахунках для моделювання умов контактів із силою тертя, коли між „реальними“ шарами розташовують псевдошар з особливими деформаційними характеристиками. Це дозволяє в умовах жорсткого контакту моделювати взаємодію окремих елементів розрахункової моделі в умовах, наближених до реальних, і при цьому не виходити за рамки статичної рівноваги всієї системи.

Розглянемо тепер епюри, що представлені на рис. 3. Для випадку жорсткого контакту (рис. 3, а), при горизонтальному заляганні і незначному діапазоні фізичних характеристик породних шарів, картина розподілу напружень у значній мірі співпадає з розподілом напружень у моделі, де не враховано шаруватість [3]. А от у випадку рис. 3, б картина напружень у значній мірі відрізняється від розподілу напружень у моделі без урахування шаруватості. Така зміна в якісних і кількісних показниках картини напружень викликана введенням у розрахункову модель взаємного проковзування породних шарів. Одна ця характеристика в конкретних умовах проведення обчислювального експерименту повністю змінила структуру розподілу напружень у вугільному пласті. Тепер рівень напружень у вугільному пласті вище, ніж у навколишніх породах, і його внесок у підвищення стійкості виробки значно зростає.

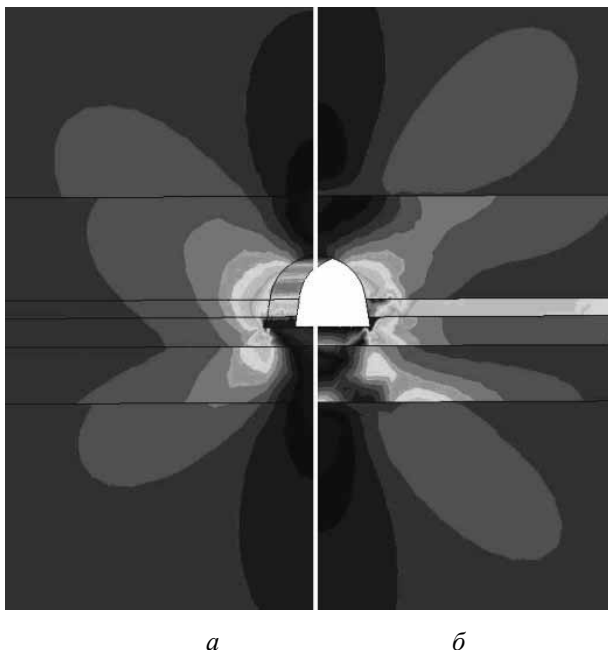


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень у масиві (а) без врахування прослизання на межі породних шарів; (б) із врахуванням прослизання на межі породних шарів

З іншого боку змінився розподіл напружень у підшві виробки. Отримана картина напружень вказує на зміну характеру здимання підшви виробки та його кількісних показників. Якщо на рис. 3, а напруження вказують на розвиток здимання підшви у вигляді сегмента кола або овалу, то на рис. 3, б видно, що здимання буде формуватися в два етапи і на першому етапі прийме вигляд трапеції. Така розбіжність у результатах вимагає різних технологічних рішень із забезпечення стійкості виробки.

#### Висновки:

- 1) значення шаруватості, як характеристики гірського масиву, для отримання якісного рішення зростає з підвищенням загальної адекватності розрахункової моделі;
- 2) вибір умов контакту сусідніх породних шарів визначається різницею в їх міцнісних і деформаційних характеристиках;
- 3) вибір характеристик гірського масиву для врахування в розрахунковій моделі здійснюється після проведення первинних тестових розрахунків та їх аналізу;
- 4) визначення технології опису окремої характеристики залежить від вибору початкових умов проведення обчислювального експерименту.

#### Список літератури / References

1. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга I. Допредельная стадия деформирования системы „порода–крепь“ / Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичёв В.В. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – Ч. I. – 172 с.  
Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. and Fomichev, V.V. (2006), *Kompyuternoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyania melkosloistogo gornogo massiva vokrug plastovoy vyrabotki. Kniga 1. Dopredelnaya stadiya deformirovaniya sistemy "poroda-krep"* [Computer Simulation of the Stress Deformed State of Finely Stratified Rock Massif Around the Workings. Book 1st. The State Preceding Deformation of the "Rock-Lining" System], Part 1, System Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.
2. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга II. Предельное и запредельное состояние системы „порода – крепь“ / Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичёв В.В. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – Ч. II. – 192 с.  
Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. and Fomichev, V.V. (2007), *Kompyuternoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyania melkosloistogo gornogo massiva vokrug plastovoy vyrabotki. Kniga 2. Predelnoye i zapredelnoye sostoyanie sistemy "poroda-krep"* [Computer Simulation of the Stress Deformed State of Finely Stratified Rock Massif Around the Workings. Book 2nd. Deformed State of the

“Rock-Lining” System] Part 2, System Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.

3. Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса / [В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др.] – Днепропетровск: ТОВ „Підприємство „Дріант“, 2010. – 328 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A. and Simanovich, G.A. (2010), *Metody rascheta peremeshcheniy i uprochneniya prikonturnykh porod gornykh vyrobotok shakht Zapadnogo Donbassa* [Methods for Calculation of the Displacement and Strengthening of the Marginal Rocks in Mining Pits of the Western Donbass], TOV “Pidpryiemstvo “Driant”, Dnipropetrovsk, Ukraine.

**Цель.** Определить характер изменения напряженно-деформированного состояния системы „горный массив – крепь“ при изменении геометрических и механических параметров расчетной модели.

**Методика.** При проведении конкретных вычислительных экспериментов одни и те же характеристики горного массива могут быть описаны различным образом. Слоистость является макрохарактеристикой и должна моделироваться с высокой степенью адекватности в отдельных случаях. Выработка, как технологический элемент, относится к группе временных объектов, для которых себестоимость поддержания должна быть сравнима с технологической и финансовой целесообразностью. Итак, запас прочности такого элемента должен быть минимальный и достаточный в равной степени. Таких показателей, для реальной пластовой выработки, можно достичь только при учете геометрии породных слоев и угла падения пласта в расчетной модели. Псевдослой с особыми деформационными характеристиками используется в расчетах для моделирования условий контактов с силой трения между „реальными“ слоями. Это позволяет в условиях жесткого контакта моделировать взаимодействие отдельных элементов расчетной модели в условиях, приближенных к реальным, и при этом не выходить за рамки статического равновесия всей системы.

**Результаты.** Создана методика комплексного моделирования взаимного влияния слоистости и угла падения горного массива с целью улучшения количественных и качественных показателей расчетной модели, используемая для анализа устойчивости выемочных выработок шахт Западного Донбасса. Получены рекомендации по учету различных характеристик мелкослоистого горного массива при проведении расчетов методом конечных элементов.

**Научная новизна.** Определены подходы к выбору характеристик горного массива и крепи выработки при их моделировании в вычислительном эксперименте. Показана величина влияния на получаемый результат различных характеристик реального горного массива.

**Практическая значимость.** Обеспечение выбора оптимальных показателей охраны выработок на шахтах Западного Донбасса. Снижение себестоимости угля за счет уменьшения вложений в поддержание подготовительных выработок.

**Ключевые слова:** горный массив, слоистость, угол падения, напряженно-деформированное состояние, вычислительный эксперимент, выработка

**Purpose.** To determine the type of change of deflected mode of the system ‘rock massif – support’ during change of geometrical and mechanical parameters of the computational model.

**Methodology.** During specific numerical experiments the same characteristics of the rock can be described in different ways. Stratification is a macro-characteristic and should be modeled with a high degree of adequacy in each individual case. Mine opening is a technological element which belongs to the group of temporary objects, for which the cost of maintenance should be comparable with the technological and financial feasibility. Thus, the strength margin of such an element should be minimal sufficient. It can be achieved for the real in-seam working only if the computational model takes into account the geometry of rock layers and the angle of inclination. Pseudo-layer with specific deformation characteristics is used in the calculations to simulate the conditions of contact with the force of friction between the “real” layers. This allows us to simulate the conditions of rigid contact, the interaction of individual elements of the computational model under conditions close to reality, and it does not go beyond the static equilibrium of the system.

**Findings.** The methodology of the complex modeling of mutual influence of stratification and inclination angle of rock was created in order to improve the quantitative and qualitative indicators of the computational model used for analysis of the stability of mine workings in Western Donbass mines. Recommendations on integration of various characteristics of stratified rock in the calculations by means of finite element method were developed.

**Originality.** Approaches to the selection of the characteristics of the rock and working support for their simulation in the computational experiment were suggested. The influence of various characteristics of a real rock massif on the obtained results was shown.

**Practical value.** The results provide selection of optimal safety parameters in the mines of the Western Donbass and reduce of the cost of coal due to reducing of investments into maintenance of development workings.

**Keywords:** rock massif, stratification, inclination angle, deflected mode, computational experiment, mine working

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бондаренком. Дата надходження рукопису 28.11.11.*