

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗДИМАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ АПАРАТУ ТЕОРІЇ СТІЙКОСТІ МЕХАНІЧНИХ
СИСТЕМ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Описаны возможные направления развития исследований явлений, сопровождающихся большими пластическими деформациями (исследование геодинамических явлений, явлений потери устойчивости почвы выработки (пучения) и т.п.).

**RESEARCH OF ROCKS HEAVING PROBLEM WITH THE USE THE
TOOLS OF THE THEORY OF MECHANICAL SYSTEMS STABILITY:
RAISING OF TASK**

Possible directions of development of researches of the effects, attended with large plastic strains are described (research of the geodynamics effects, effects of losses of roadway floor sustainability (rock heaving) etc.).

Вступ. В даний час гірничі роботи при розробці родовищ корисних копалин все більше поглиблюються. При цьому геомеханічна ситуація з глибиною погіршується і прояви гірського тиску в підземних виробках стають все більш інтенсивними і небезпечними: частішають випадки раптових викидів вугілля, породи і газу, гірських ударів, величини зсувів контуру виробки з боку підшви перевищують 1,0 м, форми здимання порід підшви стають все більш різноманітними. Очевидно, що теоретичні моделі, які використовувалися для дослідження описуваних процесів і прогнозу стану геомеханічної системи «протяжна виробка – порідний масив» на менших глибинах, повинні удосконалюватися і адекватно відображати особливості поведінки гірських порід в оголеннях при геомеханічній ситуації, що змінюється.

Гірський тиск у виробках проявляється у формі зростаючого навантаження на кріплення, деформацій контуру виробки, у вигляді здимання порід підшви, обвалень породи з боків і покрівлі виробки, газодинамічних явищ, гірських ударів тощо. Причому деформації контуру виробки є визначальною ознакою при оцінці впливу гірського тиску на її стан. Досить умовно найбільш значущі прояви гірського тиску за ознакою величини деформацій на контурі виробки і швидкості їх протікання можна розділити на дві групи.

До першої групи відносяться такі геомеханічні явища, які проявляють себе у виробці у вигляді зсувів порідного контуру на величину до 20-30 см і які є реалізацією пластичних (непружних) деформацій. Ці явища досить адекватно можуть бути описані на основі аналітичних рішень із залученням моделей суцільного середовища (наприклад, [1]).

Явища, що супроводжуються великими пластичними (непружними) деформаціями (коли зсуви порідного контуру перевищують названий рівень переміщень), відносяться до другої групи. Залежно від фізико-механічних властивостей порід, наявності або відсутності води і газу в масиві, розмірів виробки, великі пластичні переміщення можуть реалізовуватися як у вигляді миттєвих

динамічних процесів (наприклад, викиди вугілля і породи, гірські удари, явища раптових здимань підошви протяжних виробок), так і розвиватися протягом достатньо тривалого періоду часу (наприклад, розвиток здимання порід підошви у класичному розумінні). Математичний опис як одних, так і інших явищ з позицій загальноприйнятих моделей пружно-пластичного або пружно-в'язко-пластичного середовища стає досить складним, і для їх дослідження потрібні особливі підходи і спеціальні моделі.

Метою цієї статті є викладення поглядів на напрямки досліджень при вивченні геомеханічних процесів, що супроводжуються великими нерушними деформаціями породного середовища.

Основна частина. Збільшення з глибиною початкового напруженого стану порідного масиву призводить до того, що перерозподіл його потенційної енергії навколо виробки відбувається швидше (якщо так можна висловитися – знижується інерція реакції масиву). Це, разом з підвищенням рівню потенційної енергії, і є причиною появи нових форм проявів гірського тиску і підвищення інтенсивності їх протікання, що часто призводить до катастрофічних, а нерідко і до трагічних наслідків.

У таких умовах актуальним стає використання розвиненої системи моніторингу стану порідного масиву навколо виробки і прогнозування зміни його енергетичних станів з високим рівнем вірогідності, для чого потрібне вирішення відповідних геомеханічних задач. Зараз вже можна стверджувати, що це можливо тільки із застосуванням обчислювальної техніки і відповідних чисельних методів моделювання.

Необхідність у виділенні класу задач з великими деформаціями продиктована ще і тим, що під час чисельних вирішень геомеханічних задач (найчастіше – методом скінчених елементів) використовуються програмні засоби, що були спочатку розроблені для структурного аналізу виробів з металів і подібних до них об'єктів з інших матеріалів. Тобто, мова ведеться про тіла, обмежені за розміром, а, отже, про деформації, сумірні з розмірами самих досліджуваних об'єктів, навіть при використанні нелінійних моделей поведінки матеріалу досліджуваного об'єкту, наприклад, в задачах про штампування металу. Навіть тут зміна початкової форми об'єкту і отримувані при цьому величини деформацій хоча і приймають значення, істотно більші, ніж при лінійних моделях середовища, проте залишаються в межах одиниць або перших десятків сантиметрів і не можуть задовольняти вимогам адекватності реальним явищам, що відбуваються в порідному масиві навколо виробки.

Вказані обставини призводять до того, що якщо щодо аналізу *напруженого стану* приконтурного масиву ці програмні засоби виявляються ще достатньо задовільними, то в частині *аналізу переміщень контуру* досліджуваної виробки результати обчислень за цими моделями середовища не відповідають дійсності. Тому виникає необхідність створення нових гіпотез для опису порідного середовища, що руйнується, і розробки доповнень до існуючих програмних пакетів або розробки для завдань геомеханіки спеціальних програмних засобів, що дозволяють отримати адекватні результати.

Альтернативне рішення слід шукати також в застосуванні принципово інших моделей середовища, відмінних від зазвичай використовуваної моделі суцільного середовища, і розвитку відповідних чисельних методів для таких середовищ. Прикладом може служити модель блокового середовища і чисельний метод дискретних елементів, розвиток якого стосовно геомеханічних задач відбувається останнім часом. Проте цей метод понад усе підходить для дослідження динамічних процесів, таких, наприклад, як обвалення, раптові викиди і подібних явищ, розвиток яких відбувається в період від часток секунд до перших секунд, і навряд чи слід чекати великої ефективності при дослідженні здимання підошви і подібних процесів, розвиток яких відбувається протягом відносно тривалого періоду часу (добы, тижні, місяці).

Ще одна складність, що стоїть на шляху підвищення точності отримуваних рішень геомеханічних задач з великими деформаціями – явища і процеси, що є об'єктами таких задач, найчастіше вимагають їх розгляду з позицій оцінки стійкості рівноваги їх стану або руху. Причому явище здимання підошви, як показано в [1-2], також є механічним явищем втрати пружнопластичної стійкості підошви.

У механіці твердого тіла стійкість механічної системи є достатньо складним поняттям. Залежно від типу системи, про стійкість якої йдеться, існують як різні визначення стійкого або нестійкого стану, так і різні форми поведінки системи в процесі навантаження.

Початок досліджень стійкості механічних систем пов'язаний з роботами Л. Ейлера, в яких розглядалася втрата стійкості ідеального пружного стрижня, що стискається осьювою силою. У роботі [3] приводиться визначення критерію стійкості пружних систем (або бифуркаційна форма критерію стійкості Ейлера): *якщо можливий перехід з початкового стану в деякий інший – бифуркація рівноваги – при незмінних зовнішніх силах, то стан пружної системи нестійкий*. У тій же роботі надається і більш узагальнене визначення критерію стійкості механічної системи, яке полягає в наступному: *стан механічної системи є нестійким, якщо під дією скільки завгодно малих збурюючих сил збурений рух, що виникає при цьому, буде таким, що розходить від початкового стану; інакше стан системи вважається стійким*.

Серед нестійких станів розрізняють нестійкість «в малому», коли втрата стійкості стану системи відбувається при скільки завгодно малих рівнях збурень, і нестійкість «у великому», тобто втрата стійкості відбувається при достатньо великих рівнях збурень, при цьому «в малому» система може бути стійка.

При розгляді поведінки пружних механічних систем розділяють *незбурений* (тобто, до втрати стійкості) і *збурений* (тобто, після втрати стійкості) процес і виділяють ряд випадків, що відрізняються властивостями кривих рівноважних станів « P - u » (де P – параметр навантаження, u – характерне переміщення системи). Найбільш характерні випадки описані в роботі [4], з яких видно, що у разі пружних механічних систем мова йде про втрати стійкості стану.

Проте у разі систем пружно-пластичних і спадкових, до яких відноситься і порідний масив, що вміщає виробку, не може розглядатися втрата стійкості стану. Це пов'язано з тим, що рішення задачі про втрату стійкості пружних систем зводиться до відшукування значення критичних навантажень, при яких можлива біфуркація стану рівноваги. У разі ж, наприклад, врахування повзучості і дослідження втрати стійкості такої механічної системи поняття критичного навантаження зникає, оскільки при будь-якому навантаженні після закінчення деякого «критичного» часу характерне переміщення системи прагне до нескінченності. При цьому застосування «пружних» критеріїв до оцінки стійкості систем пружно-пластичних може привести, як указується в [3], до виводу про те, що будь-який пружно-пластичний стан є нестійким через присутність незворотних деформацій у стані, стійкість якого досліджується. Тому очевидно, що до дослідження втрати стійкості пружно-пластичних систем повинні застосовуватися особливі підходи та інші, ніж для пружних систем, критерії стійкості.

Розвиток концепцій теорії стійкості тіл за межею пружності відбувався на базі ідей теорії стійкості пружних тіл. Перші дослідження втрати стійкості тіл за межею пружності належать Ф. Енгессеру, Ф.С. Ясинському і Т. Карману, переконання яких отримали розвиток в роботах А.А. Іл'юшина. Ці дослідження ґрунтувалися на використанні уявлень Ейлера про існування суміжних форм рівноваги разом з початковою.

Пізніше, в роботах Ф. Шенлі і Ю.М. Работнова, розвинених Р. Хиллом, В.Д. Ключниковим і іншими, була розвинена щодо пружно-пластичних систем *концепція навантаження, що продовжується*. В цьому випадку передбачається, що при втраті стійкості відбувається зростання навантажень. По суті в цій постановці мова йде про *розгалуження форм руху, а не статичної рівноваги*. Такий погляд на стійкість пружно-пластичних систем, що деформуються (у тому числі і системи «виробка-порідний масив»), є, мабуть, більш виправданим.

Таким чином, втрата стійкості пружно-пластичних систем, як було показано в [3], не є втратою стійкості стану рівноваги, а є втратою стійкості руху частинок тіла в процесі деформації, що розуміється як повільний рух континууму. При цьому поняття стійкості руху є більш загальним, ніж поняття стійкості рівноваги [4].

У зв'язку з цим ефекти раптового здимання підосви виробок, що мають місце в антрацитних шахтах, і відбуваються у вигляді «перескоків» контуру, а також динамічні прояви деформації порід підосви виробок, що протікають у вигляді раптового руйнування, є окремим випадком загального явища, тим самим підтверджуючи правильність погляду на здимання як на явище втрати пружно-пластичної стійкості. Якщо ж породи м'якші, такі, що включають глинисті частинки (саме такі характерні для умов Центрального Донбасу), здимання у вигляді «перескоку» маловірогідне. Тому більш відповідним буде розгляд здимання в таких породах саме з позицій втрати стійкості руху масиву навколо виробки.

Підхід до дослідження втрати стійкості пружно-пластичної системи як до втрати стійкості руху континууму зводиться [3] до відшукування особливих точок основного (незбуреного) процесу деформації – точок біфуркації, тобто таких, в яких виявляється галуження процесу, і (за Ключниковим) точок псевдобіфуркації, в яких галуження ще не спостерігається, але присутність яких в історії процесу зумовлює появу точок біфуркації.

При дослідженні втрати пружно-пластичної стійкості подошви здається гідним уваги також дослідження розвитку збуреного процесу деформації (після моменту втрати стійкості), оскільки саме в цей період розвиваються великі переміщення на контурі виробки і зростає їх інтенсивність. Величина цих великих переміщень є основним предметом при дослідженнях процесів деформації масиву навколо виробки.

Проте такі дослідження є достатньо складним завданням. Строгий математичний апарат, критерії і підходи розроблені в основному для пружно-пластичних середовищ, що зміцнюються, засновані на динамічному підході і достатньо складні, а урахування розміцнення і розпушення матеріалу в таких моделях призведе до ще більших математичних складнощів. Цілком очевидно, що строга постановка задачі про втрату стійкості руху континууму в подошві гірської виробки, виведення критеріїв стійкості, розробка математичного апарату аналізу як основного, так і збуреного процесів стосовно гірських проблем, відшукування сімейства біфуркаційних і псевдобіфуркаційних точок процесу деформування приконтурного масиву, отримання рішень (найімовірніше – із застосування чисельних методів), зручних для практичного застосування, є завданнями настільки ж актуальними, наскільки ж і складними, кожне з яких вимагає окремого глибокого дослідження.

У роботі [5] описаний алгоритм дослідження збуреного процесу під час розвитку здимання подошви виробки. Суть підходу полягає в тому, що безперервний у часі процес здимання розглядається як дискретний квазістатичний процес і реалізується після настання моменту втрати пружнопластичної стійкості рівноваги системи «виробка-масив» з боку подошви виробки. Для дослідження розвитку збуреного процесу використовується узагальнена крива розвитку здимання, яка повинна бути отримана під час попередніх натурних вимірів. Ділянка кривої, розташована після точки втрати стійкості, розбивається на ряд відрізків і в межах кожного такого відрізка визначається величина приросту переміщень контуру – так звані додаткові переміщення. Використовуючи спеціальний алгоритм методу скінчених елементів і вирішуючи покроково задачу про НДС порідного масиву, на кожному кроці до контуру виробки в її подошві прикладаються значення відповідних додаткових переміщень. Алгоритм дозволяє отримувати картину розвитку зони непружних деформацій під час розвитку збуреного процесу.

Безумовно, даний підхід не позбавлений недоліків: він не дозволяє проводити чисельні дослідження без попередніх натурних вимірів і побудови кривої розвитку здимання, тому результати моделювання можуть бути використані тільки у виробках, розташованих в дуже схожих умовах. Але це перша

спроба чисельного дослідження збуреного процесу при втраті пружно-пластичної стійкості порід підосви протяжної виробки, яка може служити основою для подальшого розвитку цього напрямку досліджень.

Висновки. Завершуючи вищесказане, можна сказати наступне:

– умови, що склалися, при проведенні протяжних виробок призводять до необхідності виділення класу явищ, що відрізняються великими пластичними деформаціями, до яких відносяться як явища, що миттєво протікають (раптові викиди і гірські удари), так і такі, що розвиваються в перебіг тривалого періоду часу (здимання порід підосви). У таких умовах актуальним стає використання розвиненої системи моніторингу стану порідного масиву навколо виробки і прогнозування зміни його енергетичних станів з високим рівнем вірогідності, для чого потрібне вирішення відповідних геомеханичних задач;

– при дослідженні явищ з великими пластичними деформаціями застосування звичайних чисельних методів стає неможливим через погану їх адаптованість до подібних задач, тому такі методи виявляються задовільними в основному для аналізу напруженого стану порідного масиву. Рішення слід шукати в застосуванні відмінних від зазвичай використовуваної моделі суцільного середовища принципово інших моделей і розвитку відповідних чисельних методів для таких середовищ. Для дослідження динамічних геомеханічних процесів одним з досить відповідних чисельних методів може бути метод дискретних елементів, розвиток якого стосовно геомеханічних задач відбувається останнім часом;

– при дослідженні явища втрати пружно-пластичної стійкості підосви (здимання), потрібна строга постановка задачі про втрату стійкості руху континууму в підосві гірської виробки; виведення відповідних критеріїв стійкості; розробка математичного апарату аналізу як основного, так і збуреного процесів стосовно гірських проблем, а також його реалізація у вигляді програмних продуктів для ЕОМ; відшукування сімейства біфуркаційних і псевдобіфуркаційних точок процесу деформування приконтурного масиву. Існуючі алгоритми дослідження збуреного процесу під час розвитку здимання можуть служити основою для подальшого розвитку даного напрямку досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шашенко А.Н. Упругопластическая задача для структурно-неоднородного массива, ослабленного круглой выработкой. – Прикл. механика. – 1989. – т.25, № 6. – С.48-54.
2. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: Дис. докт. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.
3. Ключников В.Д. Устойчивость упругопластических систем. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 240 с.
4. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 352 с.
5. Шашенко А.Н., Гапеев С.Н. Подход к моделированию возмущенного процесса при исследовании потери упругопластической устойчивости почвы одиночной выработки // Современные проблемы шахтного и подземного строительства: Материалы международного научно-практического симпозиума. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Вып. 5. – С. 56-63.

Рекомендовано до публікації д.т.н. А.М. Роснком 23.06.09