

21. **Щур І.З.** Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітросонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / **І.З. Щур, В.І. Климко** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 2. – С. 92–100.

22. Пат. № 105303 Україна, МПК (2016.01) F03D 1/04, F03D 9/25. Спосіб отримання електроенергії / **Лобов В.Й., Лобова К.В.**; заявл. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № 201509470; заявл. 01.10.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. – 6 с.

23. Пат. № 119021 Україна. МПК (2006) F03B 13/00/ Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням технологічної установки / **Лобов В.Й., Лобова К.В. Даць А.В.**; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № u201701906 заявл. 27.02.2017; опубл. 11. 09. 2017, бюл. №17.

24. SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition by Stuart A. Bover, Published by ISA The instrumentation Systems and Automation Society; 3 rd edition.

25. Системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA-системы) // Мир компьютерной автоматизации (3/1999), <http://ankey.ru/tech/scada/intro.htm>

26. **Rajesh Singla and Arun Khosla** . Intelligent Security System for HMI in SCADA Applications / International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 2, No. 4, August 2012. 444-448

27. Chapter 47 SaskEnergy—SCADA System Security 1.0 MAIN POINTS

28. SCADA система. SIMATIC WinCC V7.0 // ООО Сименс. Информация по продуктам. – URL: http://iad.t.siemens.ru/assets/files/infocenter/catalogs_and_brochures/as/ProductInfo/13_WinCC_V70_r.pdf. – С.126–129.

Рукопис подано до редакції 16.04.2018

УДК 622.234.4: 622.349.5: 622.831

О.В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. екон. наук, доц., Криворізький національний університет

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ МАСИВУ ПРИ ФОРМУВАННІ ТА ПІДТРИМЦІ ПІДЗЕМНИХ ГІРСЬКИХ ВИРОБОК

Мета. Метою даної роботи є розробка методики фізичного моделювання стійкості масиву при формуванні та підтримці підземних гірських виробок в умовах напружено деформованого стану масиву.

Методи дослідження. Для визначення несучої здатності та стійкості гірського масиву при формуванні та підтримці підземних виробок в умовах напружено деформованого стану масиву в роботі виконувалися експериментальні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів. Лабораторними дослідженнями встановлено та визначено якісні закономірності розвитку деформацій масиву гірських порід, комбінованих штучних масивів та умов їх функціонування при відпрацюванні як багатих залізних руд, так і бідних магнетитових кварцитів підземним способом.

Аналіз методів моделювання, заснованих на теорії подібності дозволив зробити висновок, що при моделюванні на статичних моделях обов'язково необхідно дотримуватися масштабу моделювання. Тому в процесі моделювання дотримані критерії подібності, що забезпечують подібність механічних процесів та пропорційність фізичних констант, які мають вирішальне значення для досліджуваного явища.

Наукова новизна. В процесі лабораторного експерименту вперше була отримана картина напружень і деформацій в гірському масиві при очисних роботах на ділянці родовища, що моделювала шахтне поле ш. Гігант-Глибока. Визначені залежності та встановлені закономірності несучої здатності та стійкості масиву магнетитових кварцитів при формуванні та підтримці підземних гірських виробок в умовах його напружено деформованого стану.

Практична значимість. Запропонована методика фізичного моделювання несучої здатності та стійкості масиву при формуванні та підтримці очисних камер в умовах напружено деформованого стану гірського масиву при відпрацюванні магнетитових кварцитів підземним способом. Отримана фізична картина деформації денної поверхні при формуванні та існуванні очисних камер довгострокового консервування на трьох робочих горизонтах.

Результати. На підставі виконаних досліджень та встановлених залежностей визначено зміну напружено-деформованого стану масиву в умовах шахтного поля ш. Гігант-Глибока. Доведена доцільність заповнення існуючих камер закладочними сумішами. Це дозволяє забезпечити безпеку та можливість подальших робіт та гарантує збереження денної поверхні в зоні впливу існуючих відпрацьованих камер.

Ключові слова: фізичне моделювання, підземні виробки, очисні камери, напружено деформований стан, гірський масив.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-97-102

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Дослідження стійкості масиву гірських порід при формуванні в ньому очисних камер довгострокового консервування в натурних умовах пов'язані з великими виробничими труднощами.

У разі досліджень комбінованих масивів, що представляють собою відпрацьовані очисні ділянки, камери яких заповнені твердіючим або іншим закладним матеріалом, задача отримання реальної картини процесів, що відбуваються в масиві також надзвичайно ускладнена. Це

викликано, перш за все, відсутністю досвіду відпрацювання родовищ Криворізького басейну камерними системами розробки з комбінованою закладкою виробленого простору.

Отже, для отримання адекватних результатів виникає нагальна потреба у виконанні спеціальних аналітичних і експериментальних досліджень, що дозволять розробити методику визначення оптимальних параметрів комбінованого відпрацювання родовищ камерними системами розробки з комбінованою закладкою.

Для досягнення поставленої задачі в роботі виконувалися експериментальні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів. Метою даних досліджень було вивчення якісних закономірностей розвитку деформацій масиву гірських порід, комбінованих штучних масивів і умов їх функціонування при відпрацюванні як багатих залізних руд, так і бідних магнетитових кварцитів підземним способом.

Аналіз досліджень і публікацій. Порядок проведення лабораторних досліджень та методика вибору складів для моделювання на еквівалентних матеріалах досить повно розглянута в роботах М.І. Ступніка [1, 3–5], О.В. Калініченко [1–5], І.Д. Насонова [6], Г.М. Кузнєцова [7], М.В. Кірпинова [8], а також в інших роботах.

Аналіз методів моделювання, заснованих на теорії подібності призводить до висновку, що при моделюванні на статичних моделях обов'язково необхідно дотримуватися масштабу моделювання [3 – 9].

У цьому випадку всі розміри досліджуваної системи в натурі і розміри її в моделі будуть змінені в певну кількість разів.

Масштаб моделювання C_i визначається з виразу

$$C_i = \frac{l'_n}{l'_m} = \frac{l''_n}{l''_m} = \dots = \frac{l^i_n}{l^i_m}, \quad (1)$$

де l_m, l_n – лінійні розміри відповідно в моделі в натурі.

При розгляді фізичного моделювання з використанням еквівалентних матеріалів В.Р. Іменітов [11] визначив принцип підбору матеріалу моделі. Так для дотримання рівності зчеплення матеріалів моделі і природи при моделюванні на еквівалентних матеріалах необхідно зменшити кількість дрібних фракцій. Однак, при цьому, може змінитися коефіцієнт внутрішнього тертя ρ , для якого масштаб моделювання дорівнює одиниці, тобто $tg\rho_m = tg\rho_n$.

Подальші дослідження ряду авторів [5, 7, 9, 10, 12] підтверджують необхідність дотримання цих критеріїв подібності. Відповідність зазначених критеріїв досягається підбором еквівалентного матеріалу, в якому гранулометричний склад має першорядне значення.

Постановка завдання. В процесі моделювання дотримання всіх критеріїв подібності, що забезпечують подібність механічних процесів неможливо, тому необхідно виділити і забезпечити пропорційність фізичних констант, що мають вирішальне значення для досліджуваного явища. Тому метою даної роботи є розробка методики фізичного моделювання стійкості масиву при формуванні та підтримці підземних гірських виробок в умовах його напружено деформованого стану.

Викладення матеріалу та результати. Для визначення зміщення порід, а також навантажень тиску, які виникають в процесі відпрацювання гірського масиву підземним способом, необхідно дотримуватися динамічної подібності. При цьому повинні бути дотримані умови стійкості для сипучих матеріалів

$$\tau = \sigma_n \cdot tg\rho + c, \quad (2)$$

де τ – дотичні напруження на заданій площі, т/м²; σ_n – нормальні напруження на заданій площі, т/м²; ρ – кут внутрішнього тертя гірських порід, град.; c – коефіцієнт зчеплення порід.

Основною умовою динамічної подібності є дотримання подібності кута внутрішнього тертя корисних копалин, значення зчеплення порід, яке можливо досягти додатком на модель зовнішнього навантаження.

Розрахунок зовнішнього навантаження P_m , яке необхідно докласти при моделюванні, визначають за формулою, запропонованою Г.М. Кузнєцовим [7]

$$P_m = P_n \frac{l_n^3 \cdot \gamma_n}{l_m^3 \cdot \gamma_m}, \quad (3)$$

де P_m, P_n – зовнішнє навантаження відповідно в моделі і в натурі, т/м²; γ_n, γ_m – об'ємна вага руди відповідно в моделі і в натурі, т/м³.

Гранулометричний склад сумішей оцінюється за величиною діаметра середнього куска

$$d_{\text{сер}} = \frac{\sum d_i \cdot \gamma_{\phi}}{100}, \quad (4)$$

де $d_{\text{сер}}$ – середній діаметр куска, мм; d_i – середній діаметр фракції, мм; γ_{ϕ} – процентний вміст фракції, %.

Розрахункова кількість експериментів визначається за критерієм Стюдента. Функція розподілу коефіцієнта Стюдента визначається за формулою

$$t_p = \frac{\bar{\varphi} \cdot \sqrt{n}}{S_x}, \quad (5)$$

де $\bar{\varphi}$ – середнє значення кута опору руху, град.; n – кількість виконаних експериментів; t_p – розрахункове значення критерію Стюдента; S_x – вибіркова дисперсія.

Вибіркова дисперсія відхилення визначається з виразу

$$S_x^2 = \frac{\sum (\varphi - \bar{\varphi})^2}{n-1}. \quad (6)$$

При проведенні експериментів значення t_p визначається після кожної серії дослідів. Розрахункове значення t_p порівнюється з критичним $t_{\text{кр}}$ за спеціальними таблицями [13, 14].

Якщо розрахункове значення виявляється більше критичного, досліді повторюються до забезпечення збіжності результатів на 85–95 %.

Вибір масштабу моделювання виконується виходячи з мети і завдань досліджень, глибини розробки, методики вимірювань деформацій і напружень, можливості лабораторного обладнання, фізико-механічних властивостей еквівалентних матеріалів.

В процесі експерименту була отримана картина напружень і деформацій в гірському масиві при очисних роботах.

Моделювання виконувалося на плоско-поворотному стенді розміром 5000×5000×500 мм.

Перед початком лабораторних експериментів на передню стінку моделі в масштабі 1:500 наносили геологічний розріз родовища, характерний для досліджуваної ділянки (рис. 1).

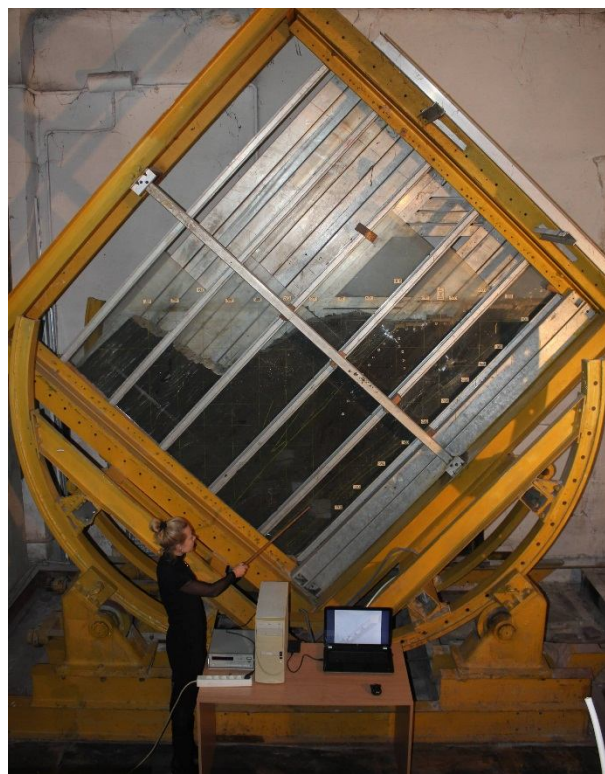


Рис. 1. Загальний вигляд плоско-поворотного стенду

Заповнення моделі еквівалентного матеріалу виконували пошарово, від лежачого до висячого боку відповідно до фізико-механічних властивостей геологічних шарів руди і гірських порід. Порядок їх розташування на геологічному розрізі відповідав стратиграфічному поділу ділянки.

Крім цього, виконувалося моделювання ділянки шахтного поля по простяганню рудного тіла. В цьому випадку досліджували поведінку гірського масиву при відпрацюванні родовища камерними системами розробки.

Перша серія експериментів була присвячена визначенню деформацій очисних горизонтів і денної поверхні при формуванні очисних камер на одному, двох і трьох горизонтах, відповідно до реальної картини відпрацьованого шахтного поля шахти «Гігант-Глибока» в поверхах 300–380 м, 460–540 м, 630–710 м.

Друга серія експериментів була присвячена дослідженню НДС масиву при заповнен-

ні очисних камер закладними матеріалами.

Технологія закладання камер здійснювалась відповідно до рекомендованої технології закладних робіт.

Технологія формування комбінованого масиву відповідала прийнятій технології заповнення моделі еквівалентним матеріалом.

Ослаблення на контактах між шарами здійснювалося за рахунок тонкого шару слидовміщуючого матеріалу.

У місцях перетину шарів і безпосередньо в самих шарах розміщували тензометричні датчики.

Тарування датчиків здійснювалося шляхом встановлення залежності показань індикаторного пристрою від деформації тензометра.

Тарування виконувалося на гідравлічному пресі ПСУ-250 при плавному збільшенні навантаження на зразок, на який перед тарування наклеювали тензометр. Деформація при таруванні вимірювалась за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділу 0,001 мм.

Електричний сигнал від тензодатчика, викликаний деформацією зразка при навантаженні преса, записувався в таблицю після чого будувався тарувальний графік. При напрузі на вимірювальному мосту порядку 3,5 В на описуваному приладі з тензометрами типу ПБ з базою 20 мм одне ділення гальванометра відповідало відносній деформації $5 \cdot 10^{-5}$ мм, з базою $5-5 \cdot 10^{-6}$ мм.

Важливою умовою надійності роботи тензометра є міцна наклейка його на робочу поверхню. Для цього місце наклейки ретельно очищається від механічного і хімічного бруду.

Для правильної орієнтації тензометрів на поверхні зразка роблять розмітку осьових ліній.

Як показала практика, найбільш ефективними є зразки гірської породи розміром $50 \times 50 \times 100$ мм.

Техніка монтажу схем тензодатчиків включає в себе всі основні правила монтажу електричної вимірювальної апаратури. Після виготовлення моделі в повному обсязі їй давали можливість відстоятися протягом 10 діб. За цей час відбувається природне ущільнення матеріалу під дією власної ваги.

Після здійснення підготовчих операцій модель повертали на кут, рівний куту падіння рудного покладу в природних умовах і починали підготовку до моделювання відпрацювання родовища шляхом виїмки очисних блоків. Для цього ділянку на задній стінці моделі, де розташовується рудний поклад закривали спеціально виготовленою розбірною секцією, яка забезпечувала доступ до будь-якої ділянки рудного тіла.

При моделюванні відпрацювання блоку еквівалентний матеріал виймався з вікна, розташованого на задній стінці моделі.

На передній площині в породах лежачого боку і на денній поверхні встановлювалися репера, призначені для реєстрації зрушень. На конструктивних елементах системи розробки (стелині, МКЦ) закріплювалися базові репера, які залишалися нерухомими на весь час проведення експерименту.

Для полегшення візуальної реєстрації зрушень при відпрацюванні моделюємого родовища на передню (скляну) площину моделі маркером наносили сітку з позначенням горизонтів і маркшейдерських осей. Після цього первісний стан моделі та наступні стадії відпрацювання покладу фіксувалися візуально, фотографувалися, а дані зсувів базових реперів заносилися в таблицю.

Вилучення запасів очисних камер здійснювалося відповідно до порядку відпрацювання родовища для отримання реальної картини напружено-деформованого стану гірського масиву після відпрацювання кожної очисної камери.

В процесі моделювання фіксувався гірничий тиск в породах висячого і лежачого боків, аналізувався характер зрушення порід і утворення тріщин, процеси, що відбувалися в моделі при відпрацюванні очисних блоків з еквівалентного матеріалу.

Крім того, фіксувалися деформації денної поверхні в процесі моделювання очисної виїмки камер на відпрацьованих ділянках родовищ.

Для коректного порівняння результатів проведених експериментальних досліджень з результатами математичного моделювання параметри лабораторного моделювання відпрацьованої ділянки шахтного поля приймалися адекватними математичній моделі. З цієї метою споча-

тку відпрацьовувалися дві очисні камери гор. 400–480 м відповідно до розрахункових математичних моделей.

На першому етапі лабораторних досліджень встановлювалася принципова збіжність отриманих результатів з результатами математичного моделювання.

Межа міцності еквівалентного матеріалу гірського масиву відповідала природній межі міцності гірського масиву на стиск $\sigma_{сжзм}=140$ МПа.

Межа міцності еквівалентного матеріалу закладки відповідала межі міцності закладки в натурних умовах в межах $\sigma_{сжз}=6$ МПа.

Величина деформацій еквівалентного матеріалу вимірювалася в контрольних точках, аналогічних контрольним точкам розрахункових досліджень при математичному моделюванні.

Результати лабораторних досліджень з урахуванням масштабу моделювання представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Величина деформацій в контрольних точках досліджуваного масиву					
Межа міцності на стиск, МПа		Деформації стелени камер, мм		Деформації денної поверхні, мм	
гірських порід	закладки	пусті камери	камери з закладкою	пусті камери	камери з закладкою
80	6	94	72	154	112
100	6	88	69	146	108
120	6	84	67	138	105
140	6	80	65	133	103

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином можна констатувати, що розрахунок напружено-деформованого стану гірського масиву з пустими відпрацьованими камерами та гірського масиву з масиву з камерами, заповненими закладним матеріалом, що виконувався чисельними методами, дозволяє отримати коректні значення величини напружень і деформацій в контрольних точках.

Виконані лабораторні експерименти підтверджують результати аналітичних досліджень. Отримані дані тотожні математичними розрахунками і показують хорошу збіжність отриманих результатів.

Величина похибки математичних розрахунків і лабораторних експериментів не перевищує 12–15 %.

Список літератури

1. **Stupnik M.I.** Determining the qualitative composition of the equivalent material for simulation of Kryvyi Rih iron ore basin rocks / M.I. Stupnik, V.O. Kalinichenko, S.V. Pysmennyi, E.V. Kalinichenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпро. – 2018. – № 4. – С. 21–27.
2. **Калініченко О.В.** Управління процесами підземних гірничих робіт з урахуванням впливу на них напружено-деформованого стану гірського масиву / О.В. Калініченко // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «технічні науки». Том 29 (68). №2, 2018. – С.232–236.
3. **Ступнік М.І.** Моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву шахти «Гігант-Глибока» при застосуванні технології з твердіючою закладкою / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, О.В. Калініченко, С.В. Письменний, М.Б. Федько // Геотехнічна механіка: міжвідомчий збірник наукових праць. – Дніпро. – 2017. – Вип. 135. – С. 229–238.
4. **Ступнік М.І.** Дослідження та моделювання напружено-деформованого стану стелін шатрової та склепистої форми / М.І. Ступнік, О.В. Калініченко // Геотехнічна механіка: міжвідомчий збірник наукових праць. – Дніпро. – 2017. – Вип. 138. – С.22–29.
5. **Stupnik M.I.** Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials / M. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pysmennyi, O. Kalinichenko, M. Fedko // Mining of Mineral Deposits, National Mining University. – 2016. – Volume 10, Issue 3. – P. 47–52.
6. **Насонов И.Д.** Моделирование горных процесов / И.Д. Насонов. – М. : Недра, 1978. – 256 с.
7. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, А.А. Филиппова. – М. : Углетехиздат, 1959. – 283 с.
8. **Кирпичев М.В.** Теория подобия / М.В. Кирпичев. – М. : Академия Наук СССР, 1953. – 95 с.
9. **Алабурхаев П.М.** Теория подобия и размерностей. Моделирование / П.М. Алабурхаев, В.Б. Торопамус. – М. : Высшая школа, 1968. – 206 с.
10. **Глушихин Ф.П.** Моделирование в геомеханике / Ф.П. Глушихин. – М. : Недра, 1991. – 240 с.
11. **Именитов В.Р.** Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений : учебное пособие для вузов / В.Р. Именитов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 504 с.
12. 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.

13. Хартман К. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др. – М. : Недра, 1977. – 552 с.

14. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / Е.Г. Чаповский. – Изд. 4-е. – М. : Недра, 1975. – 304 с.

Рукопис подано до редакції 18.04.2018

УДК 622.23.

А.С. ГРОМАДСКИЙ, д-р техн. наук, проф., В.А. ГРОМАДСКИЙ, канд. техн. наук, доц., Вик.А. ГРОМАДСКИЙ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Ю.И. ЧУМАК, ст. преподаватель Криворожский национальный университет

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРОТОВ БУРОВЫХ СТАВОВ СТАНКОВ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ

Цель – повышение производительности бурения станка шарошечного бурения за счет обоснования рациональных эксплуатационных параметров вращения бурового става.

Методы исследования. В работе использован комплекс методов научных исследований, включающий теорию подобия и анализа размерностей – при разработке модели станка шарошечного бурения, теорию скейлинга или масштабную инвариантность – при разработке устройства с накладными скользящими полумуфтами и действующей модели бурового станка, теорию спектрального анализа колебаний бурового става – при теоретическом описании поперечных колебаний, метода суперпозиции – при решении дифференциальных уравнений.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

впервые установлена зависимость появления флаттера бурового инструмента вследствие совпадения частоты его вращения с собственной частотой поперечных колебаний бурового става;

впервые установлены путем математического моделирования нелинейные безразмерные зависимости частот и амплитуд поперечных собственных колебаний бурового става как от параметров вращения става, так и от внешних возмущений.

Практическое значение. Выполнен теоретический анализ эффективности амортизаторов изгибных колебаний – НСП, установлено, что они позволяют значительно (в 6 раз) уменьшить поперечные колебания бурового става до 26 мм, однако не исключают появление флаттера бурового инструмента, поэтому обоснован выбор более эффективной системы виброгашения с накладными скользящими полумуфтами (НСП).

Разработана система гашения поперечных колебаний с НСП, эффективность которой проверена расчетами и смоделирована с помощью SolidWorks.

Разработана действующая модель станка шарошечного бурения, которая позволяет производителю станков шарошечного бурения ООО «Завод буровой техники «ДСД» выбирать рациональные параметры систем гашения поперечных колебаний буровых ставов без флаттера бурового инструмента, разработан эскизный проект и рабочая документация действующей модели, изготовление которой начато на ООО «Завод буровой техники «ДСД», г. Кривой Рог.

Разработанные рабочие чертежи действующей модели внедрены в проект на ООО «Завод буровой техники ДСД». Ожидаемый экономический эффект от внедрения действующей модели составляет 150 тыс. грн.

Результаты. Разработана система гашения поперечных колебаний бурового става с амортизаторами изгибных колебаний (НСП), которая снижает вибрацию бурового става в 7,4 раза и исключает флаттер бурового инструмента.

Ключевые слова. Станки шарошечного бурения, рациональные параметры оборотов бурового става, система гашения вибрации.

doi:

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Обоснована актуальность статьи, её связь с научными программами, планами, темами, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, подтверждена достоверность и обоснованность полученных результатов.

Анализ исследований и публикаций. Проанализированы причины возникновения и характер колебательных процессов при эксплуатации бурового оборудования. По мнению В.И. Артыма и Е.И. Крижановского проблема повышения эксплуатационной надежности трубных и штанговых колонн для бурения взрывных скважин неразрывно связана с достоверной оценкой их нагрузок. Особенностью работы элементов трубных и штанговых колонн является