УДК 622.236.234

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ ШПУРОВ С НАЛОЖЕНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ОСЕВОГО УСИЛИЯ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ИНСТРУМЕНТ

Гринько Д.А.

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: dingo17@mail.ru

В статье обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований режимов бурения шпуров с дополнительным наложением импульсов осевого усилия и крутящего момента на вращающийся буровой резец. Для проведения экспериментальных исследований разработана и изготовлена оригинальная конструкция экспериментального стенда для исследования режимных параметров бурения шпуров с возможностью наложения на вращающийся буровой резец дополнительных воздействий. Так же в статье выбран план проведения эксперимента и разработана методика его проведения на основе рототабельного центрально-композиционного планирования (РЦКП). Регрессионные зависимости, полученные с использованием известных методов математической статистики и правил проведения экспериментальных исследований, свидетельствуют о существенном влиянии дополнительных воздействий в виде импульсов крутящего момента и импульсов осевого усилия, накладываемых на вращающийся буровой резец. Импульсы крутящего момента, накладываемые на буровой резец, повышают скорость бурения шпуров за счет создания дополнительных напряжений сдвига в разрушаемой породе, однако наибольший прирост скорости бурения шпуро достигается при совместном наложении в одной фазе импульсов осевого усилия и крутящего момента на буровой резец, что обеспечивает дополнительное внедрение инструмента в породу и способствует ее объемному разрушению, что в конечном счете повышает скорость бурения.

Ключевые слова: режимные параметры, бурение шпуров, импульс осевого усилия, импульс крутящего момента, скорость бурения, экспериментальный стенд

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE REGIME PARAMETERS OF DRILLING FOR BLASTING WITH ADDITIONAL SUPERPOSITION OF IMPULSE OF AXIAL THRUST AND TORQUE TO DRILLING TOOL

Grinko D.A.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, e-mail: dingo17@mail.ru

The article substantiates the necessity of carrying out experimental investigation of drilling regimes with additional superposition of axial thrust pulses and torque on a rotating drill tool. For experimental researches, an original design of an experimental bench was developed and manufactured to study the regime parameters of drilling bore holes for blasting with the possibility of additional effects applied to the rotating drilling tool. Also, in the article, a plan for carrying out the experiment was chosen and a methodology for its implementation based on central composite rotatable design (CCRD) was developed. Regression dependencies obtained using known methods of mathematical statistics and rules for conducting experimental studies indicate the significant influence of additional influences in the form of torque pulses and axial thrust pulses applied to the rotating drilling tool. The torque impulses imposed on the drilling tool increase the drilling speed of the blastholes by creating additional shear stresses in the rock to be crushed, however, the greatest increase in the drilling speed is achieved when the axial thrust and torque are jointly imparted to the drilling tool in one phase, that provide additional implementation tool into the rock and contributes to its volumetric destruction, which ultimately increases the drilling speed.

Keywords: regime parameters, drilling for blasting, pulse of axial thrust, pulse of torque, drilling speed, experimental bench

Известно, что на скорость бурения шпуров оказывают значительное влияние такие параметры, как физико-механические свойства разбуриваемой породы (прочность и абразивность), конструкция и степень затупления применяемого породоразрушающего инструмента, а также выбранные режимные параметры бурения (частота вращения инструмента, величина осевого усилия, параметры накладываемых на инструмент импульсов) [1–3]. Перечисленные параметры условно можно разделить на управляемые и неуправляе-

мые, т.е. параметры, значениями которых можно или нельзя управлять в процессе бурения шпура. Если физико-механические свойства разбуриваемых пород и конструкция породоразрушающего инструмента относятся к неуправляемым параметрам, то режимные параметры бурения в процессе работы могут варьироваться в достаточно широких пределах, что относит их к управляемым. Установление рациональных соотношений между управляемыми (режимными) параметрами позволит существенно повысить скорость бурения шпуров [4—6].

Однако из-за сложности процесса взаимодействия резца с забоем аналитические исследования процесса разрушения породы инструментом всегда сложны, а иногда и вовсе невозможны, поэтому в большинстве случаев исследования подобных процессов проводят с помощью физического эксперимента [7].

Цель исследования

Целью данного исследования является экспериментальное установление количественных и качественных закономерностей, отображающих влияние импульсов осевого усилия и крутящего момента, накладываемых на вращающийся буровой резец, на скорость бурения шпура. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана и изготовлена конструкция экспериментального стенда, позволяющая исследовать режимы бурения шпуров с дополнительным наложением импульсов осевого усилия и крутящего момента на вращающийся инструмент;
- разработана методика проведения экспериментальных исследований.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований режимов бурения с наложением дополнительных импульсов на инструмент была разработана оригинальная конструкция бурового стенда [8] (рис. 1), так как известные ранее стенды для исследования режимов бурения позволяли проводить исследования либо только во вращательном режиме бурения, либо во вращательном или вращательно-ударном [1, 7].

Многочисленные исследования режимов бурения свидетельствуют о нелинейной зависимости скорости бурения от таких режимных параметров, как частота вращения [9, 10], частота и энергия осевых импульсов. По этой причине при разработке методики проведения экспериментальных исследований и выборе плана эксперимента был выбран план второго порядка. К тому же планирование экспериментальных исследований с использованием известных методов теории планирования эксперимента позволяет при минимуме затрат и времени получить максимум необходимой информации.

Экспериментальные исследования режимов бурения горных пород проводились с использованием методики рототабельного центрально-композиционного планирования (РЦКП), позволяющей предсказывать значения функции отклика с одинаковой точностью во всех направлениях на одинаковом расстоянии от центра плана эксперимента. Получение регрессионной модели, проверку значимости ее коэффициентов, проверку на адекватность и дальнейшее исследование модели проводили в соответствии с методикой РЦКП, изложенной в источнике [11].

Экспериментальные исследования режимов бурения проводились на цементно-песчаных образцах диаметром 70 мм. Контактная прочность образцов породы определялась по методу Л.И. Барона и Л.Б. Глатмана на гидравлическом прессе ПСУ-10. Бурение шпура проводилось моделью углепородного резца БИ-741 с масштабным коэффициентом равным 4 на режимах, соответствующих данному масштабному коэффициенту [7].

Данные с тензометрических звеньев стенда фиксировались и записывались при помощи крейтовой системы LTR L-Card (специализированного модуля АЦП для тензоизмерений LTR212) и пакета прикладного программного обеспечения для ЭВМ.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования влияния импульсов осевого усилия и крутящего момента, накладываемых на вращающийся буровой резец, проводились по методике РЦКП в диапазоне частот вращения 200–360 мин $^{-1}$ и частоте импульсов осевого усилия и крутящего момента в диапазонах 2200–4000 ипм/мин. Указанные диапазоны значений были выбраны исходя из известных рекомендаций по частоте вращения и рационального угла поворота инструмента между осевыми импульсами. Для проведения эксперимента были отобраны 3 группы пород с контактной прочностью $P_{k1} = 500 \text{ M}\Pi a$, $P_{k2} = 600 \text{ M}\Pi a$ и $P_{k3} = 700 \text{ M}\Pi a$.

В результате проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных по методике РЦКП были получены регрессионные модели, отображающие влияние импульсов крутящего момента, накладываемых на вращающийся буровой резец, на скорость бурения шпура:

– для пород с контактной прочностью $P_{k1} = 500 \text{ Mna}$

$$V_{k1m} = -5,67 \cdot 10^{-6} \cdot n_{_{\rm B}}^2 + 3,98 \cdot 10^{-3} \cdot n_{_{\rm B}} + 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{m}} - 0,52;$$

– для пород с контактной прочностью $P_{\rm k2}$ = 600 МПа

$$V_{k2m} = -5,4 \cdot 10^{-6} \cdot n_{_{\rm B}}^2 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot n_{_{\rm B}} + 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{m}} - 0,49;$$

– для пород с контактной прочностью $P_{\rm k3}$ = 700 МПа

$$V_{k3m} = -4,21 \cdot 10^{-6} \cdot n_{\rm B}^2 + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{\rm B} + 1,57 \cdot 10^{-5} \cdot n_m - 0,402;$$

где $n_{_{\rm B}}$ — частота вращения инструмента, мин $^{-1}$; $n_{_{m}}$ — частота импульсов крутящего момента, имп/мин.

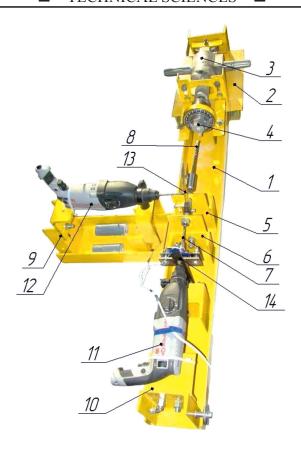


Рис. 1. Стенд для исследования режимов бурения горных пород: 1 – рама; 2 – податчик; 3 – вращатель; 4 – образец породы; 5, 6 – опоры; 7 – отрезок штанги; 8 – макет бурового инструмента; 9, 10 – подставки; 11, 12 – механизмы – возбудители импульсов осевого усилия и крутящего момента соответственно; 13, 14 – тензометрические звенья

Оценка статистической значимости коэффициентов и адекватности уравнений регрессии проводилась по критерию Стьюдента и Фишера соответственно. В результате проведенной проверки уравнений регрессии на уровне значимости $\alpha=0,05$ было определено, что полученные регрессионные модели с вероятностью не менее 95% адекватно описывают изучаемое явление. Для уравнения регрессии, полученного при бурении пород с крепостью $P_{k3}=700~M\Pi a$ и дополнительным наложением импульсов крутящего момента, построены графические зависимости (рис. 2).

В результате сравнительного анализа полученных зависимостей с известными результатами исследований для вращательного бурения [7] было установлено, что наложение импульсов крутящего момента на буровой резец повышает скорость бурения шпуров. При бурении пород в диапазоне контактных прочностей $P_k = 500-700\,$ МПа в диапазонах частот вращения инструмента 200–360 об/мин и импульсов крутящего момента в диапазоне 2200–4000 имп/мин позволяет повысить ско-

рость бурения в 1,02—1,41 раза по сравнению с вращательным способом бурения. Причем при увеличении количества импульсов крутящего момента и частоты вращения наблюдается уменьшение интенсивности прироста скорости бурения. Это связано с превышением рекомендуемого рационального числа импульсов на один оборот и снижением удельной подачи инструмента соответственно.

При исследовании совместного влияния импульсов осевого усилия и крутящего момента на скорость бурения была также использована методика РЦКП. Диапазоны варьирования факторов модели и образцы пород были приняты такими же, как и в предыдущем опыте.

В результате проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных были получены регрессионные модели, отображающие влияние совместного наложения на буровой резец импульсов осевого усилия и крутящего момента, на скорость бурения шпура:

– для пород с контактной прочностью $P_{k1} = 500 \ \mathrm{MIIa}$

$$\begin{split} V_{k1mo} = & -1,02 \cdot 10^{-6} \cdot n_{_{\rm B}}^2 + 9,48 \cdot 10^{-4} \cdot n_{_{\rm B}} - 8,77 \cdot 10^{-9} \cdot n_{_{o}}^2 + 5,75 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{o}} - \\ & -1,48 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{m}} + 9,85 \cdot 10^{-9} \cdot n_{_{m}} \cdot n_{_{o}} - 0,036; \end{split}$$

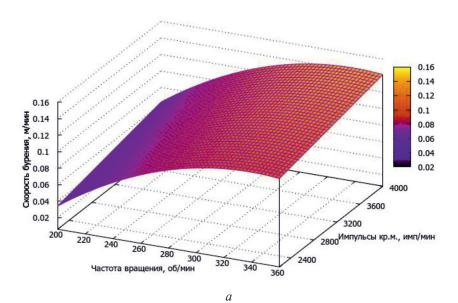
– для пород с контактной прочностью P_{k2} = 600 МПа

$$\begin{split} V_{k2mo} = -9,59 \cdot 10^{-7} \cdot n_{_{\rm B}}^2 + 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot n_{_{\rm B}} - 8,35 \cdot 10^{-9} \cdot n_{_{o}}^2 + 4,95 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{o}} - \\ -1,31 \cdot 10^{-5} \cdot n_{_{m}} + 9,19 \cdot 10^{-9} \cdot n_{_{m}} \cdot n_{_{o}} - 0,006; \end{split}$$

– для пород с контактной прочностью $P_{k3} = 700 \text{ M}\Pi a$

$$\begin{split} V_{k3\,mo} = -9,24\cdot10^{-7}\cdot n_{_{\rm B}}^2 + 7,89\cdot10^{-4}\cdot n_{_{\rm B}} - 7,83\cdot10^{-9}\cdot n_{_{\it O}}^2 + 4,34\cdot10^{-5}\cdot n_{_{\it O}} - \\ -1,24\cdot10^{-5}\cdot n_{_{\it M}} + 8,87\cdot10^{-9}\cdot n_{_{\it M}}\cdot n_{_{\it O}} - 0,014, \end{split}$$

где $n_{_{\rm B}}$ — частота вращения инструмента, мин $^{\!-1};\,n_{_{\! m}}$ — частота импульсов крутящего момента, имп/мин; $n_{_{\rm O}}$ — частота импульсов осевого усилия, имп/мин.



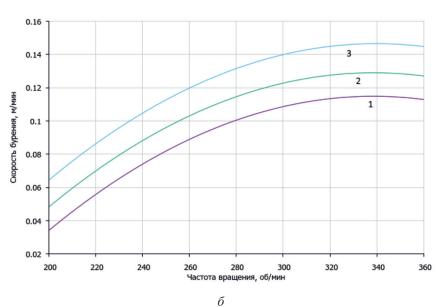


Рис. 2. Поверхность отклика регрессионной модели (а) для образцов пород с контактной прочностью $P_{k3}=700~\mathrm{MHa}$ и срезы этой поверхности (б) при частотах импульса: $1-2200;~2-3100;~4000-\mathrm{имп/мин}$

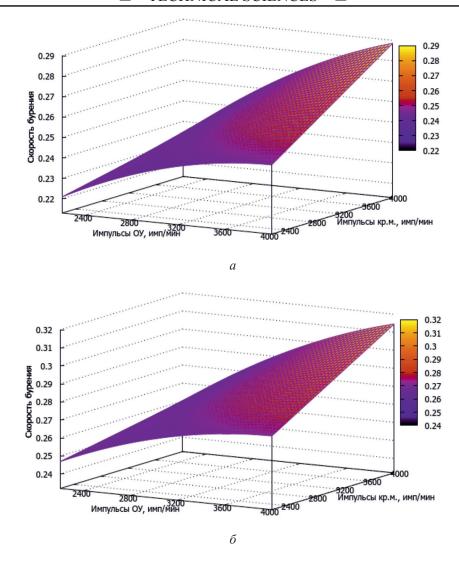


Рис. 3. Поверхности отклика регрессионной модели для образцов пород с контактной прочностью $P_{kl}=700~M\Pi a$ при частотах вращения инструмента: a-200~o6/мин; 2-360~o6/мин

Оценка статистической значимости коэффициентов и адекватности уравнений регрессии проводилась по критерию Стьюдента и Фишера соответственно на том же уровне значимости ($\alpha=0,05$), что и в предыдущем опыте. Для уравнения регрессии, полученного при бурении пород с крепостью $P_{k3}=700\,$ МПа дополнительным наложением импульсов осевого усилия и крутящего момента, построены графические зависимости (рис. 3).

Сравнительная характеристика вращательного способа бурения со способом с дополнительными воздействиями на буровой резец в виде импульсов осевого усилия и импульсов крутящего момента представлена на рис. 4.

Анализ полученных зависимостей показал, что совместное наложение на вращающийся буровой резец импульсов осевого усилия и импульсов крутящего момента позволяет в большей степени повысить скорость бурения в сравнении с вращательным способом, так как за счет импульса осевого усилия обеспечивается дополнительное внедрение инструмента в породу, а за счет импульса крутящего момента обеспечивается создание дополнительных напряжений сдвига.

Так, при совместном наложении на буровой резец импульсов осевого усилия и крутящего момента при частоте вращения 200 мин⁻¹ с частотами импульсов в диапазоне 2200—4000 имп/мин скорость бурения увеличивается в 2,46—3,14 раза, а при частоте вращения инструмента 360 мин⁻¹ с той же частотой импульсов осевого усилия и крутящего момента скорость бурения повышается в 1,78—2,36 раза.

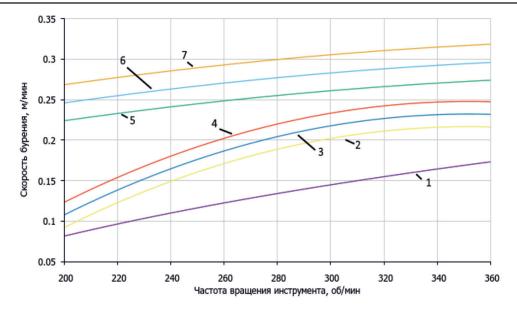


Рис. 4. Сравнительная характеристика вращательного способа бурения со способом с дополнительными воздействиями на буровой резец: 1 — вращательное бурение; 2, 3, 4 — бурение с дополнительным наложением импульсов крутящего момента с частотой 2200, 3100, 4000 имп/мин соответственно; 5, 6, 7 — бурение с дополнительным совместным наложением импульсов осевого усилия и импульсов крутящего момента с частотой 2200/2200, 3100/3100, 4000/4000 имп/мин соответственно

Заключение

- 1. Экспериментальные исследования режимных параметров бурения с дополнительным воздействием на буровой резец импульсов осевого усилия и крутящего момента с использованием разработанной методики РЦКП позволяют сократить количество опытов в эксперименте без снижения достоверности получаемых результатов и оценить совместное влияние нескольких факторов на скорость бурения.
- 2. Результаты экспериментальных исследований влияния дополнительно накладываемых на буровой резец импульсов осевого усилия и крутящего момента показывают, что совместное наложение импульсов осевого усилия и крутящего момента в диапазонах частот вращения 200–360 мин⁻¹ и частот импульсов 2200–4000 имп/мин позволяют повысить скорость бурения в 1,78–3,14 раза в зависимости от выбранных режимов.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ по проекту № 16-35-00406\17.

Список литературы

- 1. Крапивин М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев. М.: Недра, 1990. 256 с.
- 2. Лагунова Ю.А. Машиностроение. Энциклопедия / Ю.А. Лагунова, А.П. Комиссаров, В.С. Шестаков, С.В. Белов, Л.А. Гаврилова, И.Ю. Иванов, Н.П. Косарев, К.П. Порожский, Н.В. Савинова, Н.М. Суслов, А.Д. Табарин, С.Г. Фролов, С.А. Червяков, В.Е. Эпштейн; ред. совет:

- К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Горные машины. Т. IV–24, 2011. 496 с.
- 3. Цехин, А.М. Горные машины и проведение горных выработок: учеб. пособие / А.М. Цехин, А.Ю. Борисов. Кемерово: Куз Γ ТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2013. 176 с.
- 4. Гринько Д.А. Повышение эффективности бурения шпуров путем управляемого наложения импульсов осевого усилия и крутящего момента на буровой резец // Пром-Инжиниринг: труды II международной научно-технической конференции. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 235–238.
- 5. Гринько Д.А. Метод расчета и поддержания рациональных режимных параметров бурильной машины мехатронного класса: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. Новочеркасск, 2015. 158 с.
- 6. Гилёв А.В. Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов: монография / А.В. Гилёв, А.О. Шигин, В.Д. Буткин, Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 318 с.
- 7. Алимов О.Д. Бурильные машины / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников. М.: Машиностроение, 1976. С. 295.
- 8. Пат. 2516042 Российская Федерация, МПК Е 21 В 3/00, Е 21 С 39/00. Стенд для исследования режимов бурения горных пород / Сысоев Н.И., Мирный С.Г., Гринько Д.А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институту)». -2012151807/03; заявл. 03.12.12; опубл. 20.05.2014, Бюл. 14.-C.3.
- 9. Сысоев Н.И. Основы теории функционирования бурильных машин вращательного действия / Н.И. Сысоев, С.Г. Мирный. Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), 2006. 105 с.
- $10.\ \, {\rm Буткин}\ \, B.Д.\ \, {\rm Буровые}\ \, {\rm машины}\ \, и\ \, {\rm инструменты:}$ учебное пособие / В.Д. Буткин, И.И. Демченко. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.-120 с.
- 11. Сидняев Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. 463 с.