

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛОТА КАК ПЕРЕДАТЧИКА ЭНЕРГИИ УДАРА

© D. Kuzmenko

MATHEMATICAL SIMULATION OF CHISEL AS A TRANSMITTER OF ENERGY OF BLOW

Розглянуто сучасний стан інструменту для буріння свердловин. Розроблена математична модель бурового долота, як передавача енергії удару, що описує процес передачі часток енергії через долото, на основі якої, показано, що найкращою формою бурового долота є еліпсоїд обертання навколо вертикальної осі.

Рассмотрено современное состояние инструмента для бурения скважин. Разработана математическая модель бурового долота, как передатчика энергии удара, описывающая процесс передачи частиц энергии через долото, на основе которой, показано, что наилучшей формой бурового долота является эллипсоид вращения вокруг вертикальной оси.

Введение. Ежегодно в Украине тратятся десятки миллионов гривен на буровой инструмент, поскольку в стоимости горных работ доля бурения составляет от 40 до 70% от общих затрат. При этом доля скважинного бурения составляет 75-85% от всего объема проводимых буровых работ. Производство бурового инструмента составляет около 30 млн. штук в год, на что затрачивается 1/3 всех производимых дефицитных и дорогостоящих вольфрамкобальтовых сплавов.

Применение высокоэффективного бурового инструмента на горнорудных предприятиях является важным условием снижения себестоимости и повышения продуктивности добычи полезных ископаемых [1].

Одним из перспективных путей увеличения производительности бурового инструмента является повышение эффективности передачи энергии удара от поршня-ударника к породоразрушающим элементам бурового долота [2].

Постановка задачи. Разработка математической модели бурового долота для определения его рациональных конструктивных параметров.

Изложение материала и результаты. Исследование бурового долота как передатчика энергии удара наталкивается на значительные трудности, прежде всего, по той причине, что буровое долото, функционирующее в реальных условиях эксплуатации, является сложным объектом. В общем случае, понятие сложного объекта определяется той задачей, которая формулируется для его исследования [3]. Поэтому естественно выделить те особенности, которые приводят к необходимости рассмотрения бурового долота как сложного объекта. Одной из основных таких особенностей является отсутствие достаточно простого математического описания процесса передачи энергии удара, что не позволяет наглядно связать причины и следствия происходящих процессов. Важно

также подчеркнуть, что математическое моделирование процессов передачи энергии удара, опирающееся на методы теории упругости, приводит к дифференциальным уравнениям в частных производных, требующим учета соответствующих граничных и начальных условий. Аналитические решения таких уравнений возможно, как правило, при довольно грубых допущениях, что снижает их ценность, и имеют качественный характер. Несмотря на то, что разработаны численные методы решения таких задач, полученные результаты не всегда поддаются понятному исследователю анализу. Важной особенностью бурового долота является нестационарность ее поведения в условиях эксплуатации. Эта особенность проявляется в дрейфе ее характеристик, то есть в амортизации в процессе использования. Следствием нестационарности является такая особенность долота как невозпроизводимость экспериментов, что выражается в изменении параметров долота в процессе эксплуатации. Долото как сложный объект при эксплуатации все время меняется, что необходимо учитывать при ее исследовании. Особенностью долота как сложного объекта является также стохастичность ее поведения в реальных условиях эксплуатации. Эта особенность связана с наличием всякого рода второстепенных (с точки зрения исследования) процессов. Поэтому поведение долота в реальных условиях эксплуатации может оказаться неожиданным, что целесообразно рассматривать как случайный фактор, чем разбираться в механизме второстепенных процессов. Экспериментальное исследование особенностей передачи долотом энергии удара, наталкивается, как правило, на сложности, связанные или с организационными вопросами, или со значительными экономическими затратами. Кроме того, полученные в результате экспериментов результаты имеют узкий информационный диапазон. Не оставляя без внимания экспериментальные исследования, естественно выделить особую роль метода математического моделирования для исследования долота как сложного объекта [4]. Важно также подчеркнуть, что одной из причин широкого распространения метода математического моделирования в современных условиях, является возможность реализации математической модели на базе современной вычислительной техники – компьютеров, с последующим применением имитационного моделирования.

Под моделью долота понимается зависимость, которая связывает энергию передаваемого удара от параметров долота, определяемых ее конфигурацией

$$E = f(X), \quad (1)$$

где E – энергия удара долота, Дж,

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор, определяющий параметры долота.

Таковыми параметрами могут выступать линейные размеры долота (высота, диаметр и т.п.), геометрическая форма (цилиндр, эллипсоид, параболоид и т.п.).

Создание модели долота как передатчика энергии удара включает несколько этапов.

На первом этапе определяется вид зависимости (1) без учета параметров. При этом целесообразно “расщепить” модель (1) на ее структуру и параметры, то есть представить в виде пары

$$f = \langle St, C \rangle, \quad (2)$$

где St – структура модели,

$C = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ – вектор параметров модели.

На этапе структурной идентификации выделяется только структура St модели, а сами значения параметров не определяются.

На рис. 1, показано поток частиц, несущих энергию удара, который проходит по телу долота, не отражаясь от ее боковых сторон.

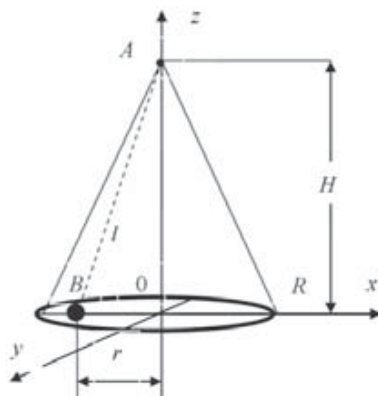


Рис. 1. Схема распространения возмущения из точечного источника

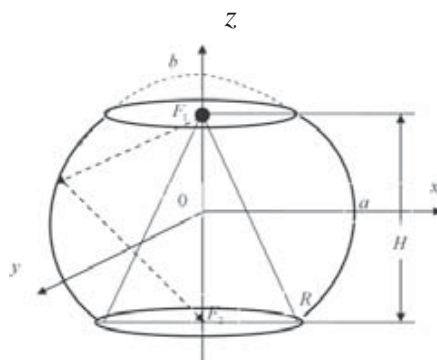


Рис. 2. Схема отражения частицы от боковой поверхности коронки в виде эллипсоида вращения

Согласно схеме, представленной на рис. 1, получено уравнение общей энергии удара, которая достигает нижнего основания долота, не соударяясь со стенками долота

$$E_1 = E_0 \left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}} \right) \quad (3)$$

На рис. 2 представлено схематическое изображение долота с боковой поверхностью в виде эллипсоида вращения и расположением источника возмущения и нижнего основания долота в фокусах этого эллипсоида. Здесь же показано прохождение частицы при ее отражении от боковой поверхности.

Согласно схеме, представленной на рис. 2, уравнение (3) запишется в виде

$$\bar{E} = 1 - (1 - A) \cdot \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 + \varepsilon^2}, \quad (4)$$

где $\epsilon_k = \frac{E}{E_0}$, $\varepsilon = \frac{c}{b}$ – эксцентриситет эллипса,

$$A = - \frac{\sum_{k=1}^N \left(\epsilon_k - 1 - \frac{2\varepsilon_k}{1 + \varepsilon_k^2} \right) \frac{\varepsilon_k}{1 + \varepsilon_k^2}}{2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{\varepsilon_k}{1 + \varepsilon_k^2} \right)^2} \text{ – коэф. альбедо}$$

Анализ формулы (4) показывает, что относительная энергия удара, передаваемая долотом, то есть измеряемая как часть общей энергии удара, зависит, от двух безразмерных переменных: коэффициента альбедо A и эксцентриситета эллипса ε . Относительную энергию удара, передаваемую долотом, естественно назвать **эффektivностью передачи долотом энергии удара**.

Согласно рис. 1 время достижения частицами, несущими энергию, основания долота будет различным, вследствие различного расстояния, проходимыми ими от точки A до основания долота. Действительно, время, затраченное на преодоление такого расстояния, может быть найдено по формуле

$$t = \frac{l}{v}, \quad (5)$$

где l – расстояние от точки A до основания долота, m ,
 v – скорость частицы, $m/сек$.

Тогда, учитывая (5), последовательно находим

$$r^2 = l^2 - H^2, \quad r^2 = v^2 t^2 - H^2. \quad (6)$$

Энергия, переносимая частицами, за время t , находится по формуле

$$E(t) = \frac{E_0 H}{2\pi} \iint_{D(t)} \frac{1}{(H^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} r dr d\varphi, \quad (7)$$

где $D(t)$ – область, в которую попали частицы.

С учетом (6), формула (7) принимает вид

$$E(t) = \frac{E_0 H}{2\pi \cdot v} \iint_{D^s(t)} \frac{1}{t^2} dt d\varphi. \quad (8)$$

Переходя от двойного интеграла (8) к повторному интегралу, последовательно находим

$$E(t) = \frac{E_0 H}{2\pi \cdot v} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\underline{t}}^t \frac{1}{t^2} dt, \quad E(t) = \frac{E_0 H}{2\pi \cdot v} \varphi \Big|_0^{2\pi} \cdot \left(-\frac{1}{t} \Big|_{\underline{t}}^t \right),$$

$$E(t) = \frac{E_0 H}{v} \cdot \left(\frac{1}{\underline{t}} - \frac{1}{t} \right), \quad (9)$$

где \underline{t} – минимальное время, необходимое для достижения частицей основания долота, $сек$.

Очевидно, минимальное время вычисляется по формуле

$$\underline{t} = \frac{H}{v}. \quad (10)$$

В свою очередь, наибольшее время, затрачиваемое частицей для достижения основания долота, находится по формуле

$$\bar{t} = \frac{\sqrt{H^2 + R^2}}{v}. \quad (11)$$

Тогда энергия удара, переносимая частицами без соударения с боковой поверхностью долота, согласно (9), находится по формуле

$$E(\bar{t}) = \frac{E_0 H}{v} \cdot \left(\frac{1}{\bar{t}} - \frac{1}{t} \right). \quad (12)$$

Подставляя (10) и (11) в формулу (12), находим

$$E(\bar{t}) = \frac{E_0 H}{v} \cdot \left(\frac{v}{H} - \frac{v}{\sqrt{H^2 + R^2}} \right),$$

или, после сокращения на v и внесения H , получаем

$$E(\bar{t}) = E_0 \cdot \left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}} \right). \quad (13)$$

Вместе с тем, формула (9) позволяет представить изменение энергии удара, достигшей основания долота, от времени.

В свою очередь, энергия удара, передаваемая частицами при отражении от боковой поверхности, также доставляется частицами за определенное время, которое может быть найдено по формуле

$$t_1 = \frac{l_1}{v}, \quad (14)$$

где l_1 – длина пути, проходимая частицами при отражении от боковой поверхности долота, м.

Учитывая, что боковой поверхностью долота является эллипсоид вращения, можно записать

$$l_1 = 2b, \quad (15)$$

поскольку длина этого пути является постоянной и равной удвоенной полуоси эллипса.

С учетом (15), формула (14) примет вид

$$t_1 = \frac{2b}{v}. \quad (16)$$

В дальнейшем, для удобства анализа естественно воспользоваться теорией подобия и анализа размерностей, представив полученные результаты в безразмерном виде. Для этого в качестве единицы измерения выберем наименьшее время достижения частицами основания долота (2.53). Тогда безразмерное время запишется в виде

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}},$$

или, с учетом (13),

$$\theta = t \frac{v}{H}. \quad (17)$$

Тогда наименьшее безразмерное время достижения частицами основания долота принимает вид

$$\underline{\theta} = 1, \quad (18)$$

наибольшее безразмерное время достижения частицами основания долота

$$\bar{\theta} = \sqrt{1 + \frac{R^2}{H^2}}. \quad (19)$$

Находим

$$\frac{R^2}{H^2} = \frac{(1 - \varepsilon^2)^2}{4\varepsilon^2}. \quad (20)$$

Тогда формула (19) принимает вид

$$\bar{\theta} = \sqrt{1 + \frac{(1 - \varepsilon^2)^2}{4\varepsilon^2}},$$

или

$$\bar{\theta} = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \varepsilon \right)^2}. \quad (21)$$

Безразмерное время достижения частицей основания долота при отражении от боковой поверхности определится последовательно, согласно (16) и (17),

$$\theta_1 = \frac{2b}{v} \frac{1}{t}, \quad \theta_1 = \frac{2b}{v} \frac{v}{H}, \quad \theta_1 = \frac{2b}{H}, \quad \theta_1 = \frac{2b}{2c},$$

по формуле

$$\theta_1 = \frac{1}{\varepsilon}. \quad (22)$$

Естественно поставить вопрос о сравнимости времен, определяемых формулами (21) и (22). Для этого решим неравенство

$$\theta_1 > \bar{\theta}. \quad (23)$$

Последовательно, подставляя (21) и (22), находим

$$\frac{1}{\varepsilon} > \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \varepsilon \right)^2}, \quad \frac{1}{\varepsilon^2} > 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \varepsilon \right)^2, \quad \frac{1}{\varepsilon^2} > 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\varepsilon^2} - 2 + \varepsilon^2 \right),$$

$$\frac{4}{\varepsilon^2} > 4 + \frac{1}{\varepsilon^2} - 2 + \varepsilon^2,$$

$$\frac{3}{\varepsilon^2} > 2 + \varepsilon^2, \quad 3 > 2\varepsilon^2 + \varepsilon^4, \quad \varepsilon^4 + 2\varepsilon^2 - 3 < 0,$$

$$(\varepsilon^2 + 1)^2 - 4 < 0. \quad (24)$$

Принимая во внимание, что

$$0 < \varepsilon < 1,$$

неравенство (24) всегда выполняется, а, значит, выполняется и (23).

Таким образом, можно утверждать, что безразмерное время, определяемое формулой (22), всегда больше безразмерного времени, определяемого формулой (21).

Зависимость относительной энергии удара от безразмерного времени, согласно (12) и (17), находится по формуле

$$\hat{\epsilon}(\theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\theta}, & 1 \leq \theta \leq \bar{\theta} \\ 1 - \frac{1}{\bar{\theta}}, & \bar{\theta} < \theta \leq \theta_1 \\ 1 - (1-A) \frac{2\epsilon}{1+\epsilon^2}, & \theta > \theta_1 \end{cases}, \quad (25)$$

На рис. 3 представленны результаты расчетов по формуле (25) зависимости относительной энергии удара от безразмерного времени достижения частицами основания долота.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает, что энергия удара передается долотом по времени, согласно формуле (25), на трех участках. Сначала энергия удара доставляется частицами, которые достигли основания долота без соударения с боковой поверхностью долота, затем наступает промежуток времени, на котором энергия удара остается постоянной. Наконец, энергию приносят частицы, которые отразились от боковой поверхности долота и достигли основания долота. График рис. 3 также показывает, что с увеличением эксцентриситета время достижения не отразившимися частицами основания долота уменьшается. Вместе с тем, уменьшается промежуток времени “ожидания” частиц, которые отразились от боковой поверхности долота. Кроме того, уменьшается также величина общей относительной энергии удара, достигшей основания долота.

Формулы, представленные в безразмерном виде, дают возможность достаточно эффективно провести имитационное моделирование.

Для исследования зависимости, представленной формулой (4) как функции двух переменных, воспользоваться методом изолиний.

С этой целью необходимо изучение изолиний, которые задаются функциями

$$1 - (1-A) \cdot \frac{2 \cdot \epsilon}{1 + \epsilon^2} = \hat{\epsilon}_k, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

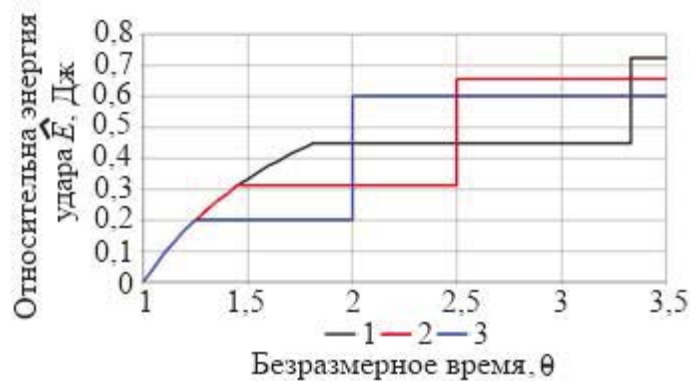


Рис. 3. Зависимость относительной энергии удара от безразмерного времени достижения частицами основания долота

(1 — $\epsilon = 0,3; A = 0,5$; 2 — $\epsilon = 0,4; A = 0,5$; 3 — $\epsilon = 0,5; A = 0,5$)

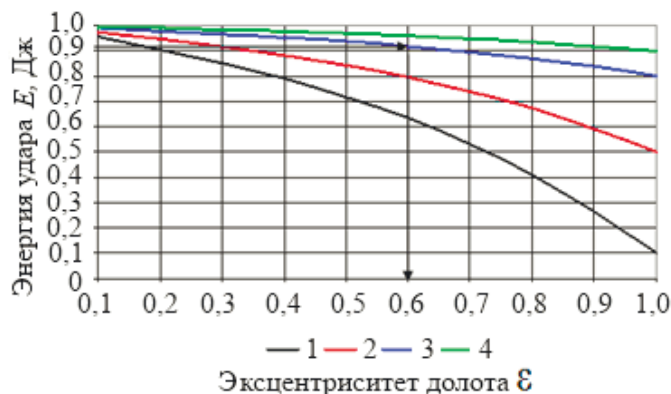


Рис. 4. Зависимость относительной энергии удара от эксцентриситета

$$1 - \underline{\epsilon} = 0,1, \quad 2 - \underline{\epsilon} = 0,5, \quad 3 - \underline{\epsilon} = 0,8, \quad 4 - \underline{\epsilon} = 0,9$$

Для этого решим уравнение (8) относительно коэффициента альbedo

$$A = 1 - (1 - \underline{\epsilon}_k) \frac{1 + \epsilon^2}{2\epsilon}, \quad (9)$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов по формуле (9) для различных величин относительной энергии удара.

Анализ графика на рис. 4 показывает, что при фиксированной величине относительной энергии удара при возрастании эксцентриситета долота коэффициент альbedo может быть уменьшен, а при уменьшении эксцентриситета долота коэффициент альbedo должен быть увеличен. Если величина относительной энергии удара задана, то для нее можно указать необходимые значения коэффициента альbedo и эксцентриситета долота. Так, как показано на графике, при $\underline{\epsilon} = 0,8$ (синяя линия) при коэффициенте альbedo, равным 0,9, эксцентриситет долота должен быть равен 0,6. Условие ограничения, накладываемое на величину относительной энергии удара, можно получить аналитически, решив неравенство относительно эксцентриситета долота при условии, что коэффициент альbedo известен (например, в результате проведения параметрической идентификации). Согласно, формуле (4) можно записать неравенство

$$1 - (1 - A) \cdot \frac{2 \cdot \epsilon}{1 + \epsilon^2} \geq \underline{\epsilon} \quad (27)$$

На рис. 5 представлены графики, описывающие неравенство (27), при различных величинах коэффициента альbedo. Анализ графиков, показывает, что с увеличением коэффициента альbedo возрастает верхняя граница эксцентриситета при постоянной величине относительной энергии удара. С другой стороны, при увеличении ограничения по относительной энергии удара при постоянном коэффициенте альbedo.

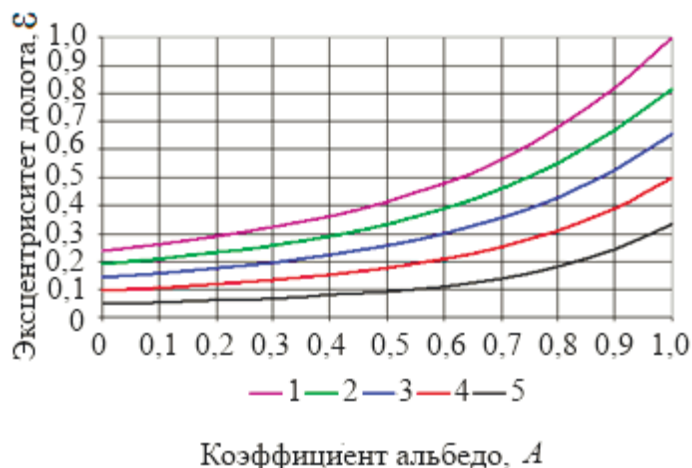


Рис. 5. Графики зависимости верхней границы эксцентриситета долота от коэффициента альбедо для различных величин ограничений по относительной энергии удара (1 – $\underline{\epsilon} = 0,5$; 2 – $\underline{\epsilon} = 0,6$; 3 – $\underline{\epsilon} = 0,7$; 4 – $\underline{\epsilon} = 0,8$; 5 – $\underline{\epsilon} = 0,9$)

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты ввиду применения обобщенных зависимостей носят множественный характер, поскольку одной величине эксцентриситета соответствует множество эллипсов, точно так же, как одной величине относительной энергии удара соответствует множество величин энергий удара.

Выводы.

1. Анализ передачи энергии удара от поршня-ударника к породоразрушающим элементам бурового долота указал на сложность процессов, связанных с распространением возмущений в сплошной среде. Вместе с тем, повышение эффективности передачи энергии удара дает возможность повысить механическую скорость бурения компенсационных взрывных скважин. Поэтому особую актуальность приобретает вопрос нахождения конструктивных параметров корпуса долота.
2. На основе физических представлений о корпускулярном характере распространения энергии удара построена математическая модель бурового долота как передатчика энергии удара.
3. Принимая во внимания оптические свойства эллипса, показано, что наилучшей формой бурового долота является эллипсоид вращения вокруг вертикальной оси с расположением источника возмущения и нижнего основания долота в его фокусах.
4. Путем применения теории подобия и анализа размерностей унифицирована математическую модель бурового долота, что позволило при имитационном моделировании получить обобщенные выводы.

Перечень ссылок

1. Каварма І.І. Вчора, сьогодні і завтра бурового інструменту / І.І.Каварма // Відомості академії гірничих наук України. – 1993. - №3. – С.27-31.

2. Блохин В.С. Повышение эффективности бурового инструмента / В.С.Блохин. - К.: Техника, 1982. -160 с.
3. Антонов А.В. Системный анализ / А.В. Антонов - М.: Высшая школа, 2004. — 454 с.
4. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент / Н.Н.Моисеев. - М.: Наука, 1979. – 512с.

ABSTRACT

Purpose. A purpose hired is development of mathematical model of boring chisel for determination of his rational structural parameters.

The methodology of research. Efficiency of transmission of energy of shock impulse was not examined in a boring instrument with учетом of his geometrical parameters, that promoted transmission of energy to the elements of boring crown ями scuffed with minimum, that promotes efficiency of destruction of mountain breed considerably.

Scientific novelty. The decision of this task folds actuality of work. Her purpose is a design of passing of shock impulse through a boring instrument with the search of rational geometrical parameters of boring instrument.

Practical meaningfulness. Analytical dependences got authors for determination of geometrical parameters crowns which allow crowns-dilators for the boring drilling compensative explosion mining hole of which speed of the boring drilling is enhanceable on 45 %.

Keywords: *crown, mining hole, structural parameters, model*

УДК 622.001.89; 622.68

© В.Ф. Монастырский, С.В. Монастырский

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ЛЕНТОЙ ГЛУБОКОЙ ЖЕЛОБЧАТОСТИ

© V. Monastyrsky, S. Monastyrsky

DESIGN OF QUALITY OF BAND CONVEYERS WITH THE RIBBON OF DEEP THE TROUGH

Представлены результаты статистических и экспериментальных исследований, выполненных для обоснованного выбора эргономических показателей качества и надежности. Определены закономерности изменения эргономических показателей в зависимости от воздействия на фундаменты конвейеров и перекрытий фабрики вибрации элементов привода. Установлено, что с увеличением мощности привода конвейеров тенденция изменения эргономических и технических показателей качества по уровню вибрации имеют одинаковую картину: сначала их значения повышаются до максимальных значений (0,95), а затем снижаются до уровня 0,92 и 0,6 соответственно. Разработаны рекомендации по расчету показателей качества ленточных конвейеров.

Представлено результати статистичних і експериментальних досліджень, виконаних для обґрунтованого вибору ергономічних показників якості і надійності. Визначено закономір-