

УДК 622.232.83

**ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ
ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
И УСТАНОВОК ДЛЯ БУРЕНИЯ ВОССТАЮЩИХ**

Дж. Де Мура, Цзяньмин Ян, С. Д. Батт

*Мемориальный университет Ньюфаундленда,
E-mail: jdmj56@mun.ca, NL A1B 3X9, г. Сент-Джонс, Канада*

Исследована эффективность модели Де Мура и Батта для прогнозирования скорости проходки при проведении выработки больших диаметров. Модель показала высокую эффективность и точность при оценке производительности бурения на примере 19 случаев эксплуатации тоннелепроходческих комплексов и установок для бурения восстающих.

Скорость проходки, тоннелепроходческий комплекс, установка для бурения восстающих, производительность бурения

DOI: 10.15372/FTPRPI20230108

Бурение — неотъемлемый этап в горной, строительной и нефтегазовой промышленности, позволяющий оценить экономическую целесообразность проектов. Скорость проходки — важный аспект бурения. Качественный выбор выемочного оборудования и точное прогнозирование его производительности на горнодобывающих и строительных объектах важны при оценке затрат и планировании работ. Тоннелепроходческие комплексы (ТПК) и установки бурения восстающих (УБВ) предназначены для механической выемки, которая является альтернативой традиционным буровзрывным работам при прокладке тоннелей и проходке выработок.

Для проходки стволов шахт и других вертикальных выработок используются УБВ. Бурятся пилотные скважины диаметром 230–350 мм, затем буровая коронка заменяется на расширитель большего диаметра, вытягиваемый вверх. Установка позволяет работать с разными углами падения и диаметрами проходки [1].

При строительстве тоннелей, прокладывании коммуникаций, систем водоснабжения и канализации, сооружении подземных хранилищ и горнодобывающих работах применяются ТПК. Данный тип установок включает в себя машины с разными рабочими диаметрами и предназначена для различных эксплуатационных условий [2]. Благодаря высокой скорости проходки

и низкой степени риска, ТПК имеет ряд преимуществ по отношению к буровзрывному методу. Однако в сложных геотехнических условиях значительно повышаются затраты на эксплуатацию оборудования и снижается безопасность работ [3].

В [3, 4] представлены первые модели прогнозирования производительности ТПК в зависимости от свойств ненарушенной породы, таких как прочность на сжатие и растяжение. Предложена модель, основанная на силе резания отдельного резца (впоследствии CSM-модель). В общем виде модели производительности бурения делятся на физически обоснованные (традиционные), построенные с помощью эмпирических зависимостей и лабораторных испытаний, и компьютерные (прогнозные), основанные на алгоритмах машинного обучения и нейронных сетей с использованием больших объемов данных.

При рассмотрении модели Маурера [5] выявлены ограничения прогнозирования по всей кривой производительности бурения, включая местоположение точки основания. Установлена линейная зависимость между постоянной буримости данной модели и осевой нагрузкой на буровую коронку (осевая нагрузка), разработана модель на основе кубической зависимости скорости проходки и осевой нагрузки (модель Де Мура и Батта). Модель применяется в нефтегазовой отрасли для прогнозирования производительности бурения коронками малого диаметра с фиксированным резцом.

Цель настоящей работы — оценка применимости модели Де Мура и Батта для бурения большим диаметром и исследование точности модели при прогнозировании производительности ТПК и УБВ. Рассматриваются различия механизма проходки у данных машин, а также влияние свойств породного массива при бурении большим диаметром. Проанализированы доступные в литературе данные по производительности ТПК и УБВ.

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Новая технология бурения по всей площади забоя описана в [6]. В ее основе лежит вращательное бурение и вакуумное удаление обломков. Предложена модель прогнозирования скорости проходки буровых машин и рассмотрена оценка неравномерности выемки породы, качества бурения, распределения обломков породы по форме и размеру, энергопотребления, выбросов парниковых газов.

В [7] представлена модель прогнозирования производительности ТПК с помощью искусственной многослойной нейронной сети с алгоритмом обучения обратного распространения. Выявлено, что прогнозирование скорости проходки ТПК зависит от большого количества параметров, которые делятся на следующие категории: свойства нетронутой породы и породного массива, геотехнические условия, характеристики машины.

Модель прогнозирования скорости проходки ТПК на основе анализа базы данных для различных объектов строительства тоннелей в условиях твердых пород предложена в [8]. Она выполнена с помощью статистических методов и представляет собой зависимость между геологическими свойствами и эксплуатационными параметрами.

В [9] представлен подход к прогнозированию производительности ТПК на основе CSM-модели, основанной на оценке режущих сил отдельных резцов [10]. Режущие силы рассмотрены как функция свойств нетронутой породы [11], ее хрупкости и трещиноватости массива [12, 13]. Параметры роторного рабочего органа (тяга, крутящий момент, мощность), требуемые для получения максимальной скорости проходки, определяются на основе анализа режущих сил, воздействующих на породный массив [14].

Предложена модель прогнозирования скорости проходки ТПК методом опорных векторов наименьших квадратов [15]. Получена корреляция скорости проходки с такими свойствами породы, как прочность на сжатие, прочность на растяжение, индекс пикового уклона, расстояние между плоскостями ослабления.

В [16] разработана модель нечеткой логики для прогнозирования скорости проходки ТПК в твердой породе на основе данных второй стадии прокладки водного тоннеля № 3 в г. Нью-Йорке. Для прогнозирования производительности бурения ТПК в модели учитывались свойства нетронутой породы и породного массива (прочность на одноосное сжатие, хрупкость породы, расстояние между плоскостями ослабления и ориентация нарушений сплошности).

Исследованы 11 участков железорудного карьера, классифицированные с позиции буримости [17]. Выполнены лабораторные испытания и геологическое картирование поверхностей забоев, определены структурные параметры породного массива с целью разработки модели по прогнозированию скорости проходки с помощью определения прочности на одноосное сжатие по отскоку молотка Шмидта. Выполнены экспериментальные работы по нахождению индекса проходки, связанного с применением УБВ [18]. Лабораторные испытания по сжатию осуществлялись с помощью гидравлического пресса образцов породы из меднорудной подземной шахты “Eti Copper Kure Asikoy”.

Существующие модели и проводимые исследования по прогнозированию производительности ТПК рассмотрены в [19]. Согласно полученным результатам, в рамках общего анализа производительности ТПК учитывались такие параметры, как скорость проходки, коэффициент технического использования, скорость подвигания и срок службы резцов.

На примере прокладки тоннелей в г. Нью-Йорке исследовано прогнозирование скорости проходки ТПК с применением следующих параметров массива: прочность на одноосное сжатие; хрупкость нетронутой породы; углы и расстояния между плоскостями ослабления [20].

В [21] изучена производительность ТПК в условиях твердых пород при строительстве тоннеля с целью выявления зависимости эксплуатационных свойств ТПК от литологических свойств породы. Для анализа производительности ТПК в натуральных условиях применялись методы нелинейной регрессии, построение древа классификации и регрессии, а также генетическое программирование.

По результатам натуральных и лабораторных испытаний установлена эмпирическая модель прогнозирования производительности УБВ с помощью простой и множественной статистической регрессии [22]. Посредством применения прочности на одноосное сжатие выполнена оценка скорости вращения и крутящего момента расширителя, на основе использования прочности на растяжение по бразильскому методу — оценка энергопотребления в реальных условиях.

Новая модель производительности ТПК при строительстве разведочного тоннеля “La Maddalena” (Италия) разработана в [23]. При этом скорость проходки и индекс проникания в породу согласуются с отдельными параметрами массива, такими как прочность на одноосное сжатие, содержание кварца и расстояние между трещинами. Представлена модель повышения точности прогнозирования скорости проходки ТПК в отдельных геотехнических условиях [24].

В [25] предложены новые уравнения и модели прогнозирования производительности ТПК, рассмотрена зависимость между скоростью проходки и свойствами массива с помощью использования статистической регрессии. Получены два нелинейных многопараметрических уравнения, оптимизированные конкурентным алгоритмом. Другие две модели проверены древом классификации и регрессии и методами программирования с генетической экспрессией.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Независимо от сферы применения (строительство, горное дело, прокладка тоннелей, нефтегазовая добыча), сущность бурения обуславливается механизмами разрушения породы. Частная терминология для отдельных сфер применения вполне допустима, однако теоретические основы неизменны во всех областях использования технологии бурения.

При нефтегазовом бурении в нормальных условиях зависимость между скоростью проходки и осевой нагрузкой представлена характеристической кривой. На рис. 1 выделены следующие участки: *A* — зона поверхностного и объемно-усталостного разрушения при бурении; *B* — зона объемного разрушения (почти линейная зависимость скорости проходки от осевой нагрузки и высокая эффективность бурения); *C* — зона максимальной нагрузки (линейная зависимость пропадает и возникает зашламовывание бурильной коронки и забоя скважины, а также нежелательные вибрации, негативно влияющие на эффективность бурения) [26]. После преодоления точки локального максимума на кривой (точки перегиба) увеличение осевой нагрузки не приводит к повышению скорости проходки [27].

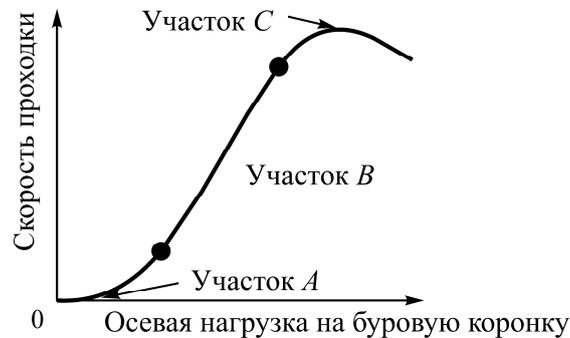


Рис. 1. Кривая производительности бурения в нефтегазовой отрасли

При эксплуатации ТПК для определения производительности в конкретных геологических условиях выполняются натурные испытания. Исследуются эксплуатационные условия ТПК с целью последующего сравнительного анализа между разными машинами и проектами. Старт-стоп-тест является примером таких испытаний. Он состоит из регистрации и анализа работы ТПК, который медленно запускается от нуля до максимальной тяги, а затем реверсируется в таком же режиме. Кроме того, в рамках теста проводится детальный геологический анализ нарушений сплошности породы и лабораторное определение ее прочностных свойств [28].

На рис. 2 представлена кривая производительности ТПК с выделением стадии докритической проходки. При низких скоростях проходки происходит дробление породы, а не ее сревание [28]. Увеличение осевой нагрузки не способствует повышению скорости проходки. В контексте нефтегазового бурения данный участок — зона поверхностного и объемно-усталостного разрушения. Механизм бурения на нем отличается от других участков кривой производительности бурения. Другая значимая точка на кривой производительности ТПК — точка трения (порог) между массивом породы и щитом ТПК, определяемая через фрикционный ход роторного рабочего органа (свободный ход) до теста на производительность проходки. В процессе фрикционного хода определяется пороговая осевая нагрузка на роторный рабочий орган при разрушении породы. Значения точки трения отличаются в зависимости от выбранных машин и маршрута прокладки тоннеля. Осевая нагрузка на роторный рабочий орган эквивалентна общему тяговому усилию или нормальному усилию на дисковый резец и определяется делением общего тягового усилия на эффективное количество дисковых резцов, расположенных на роторном рабочем органе.

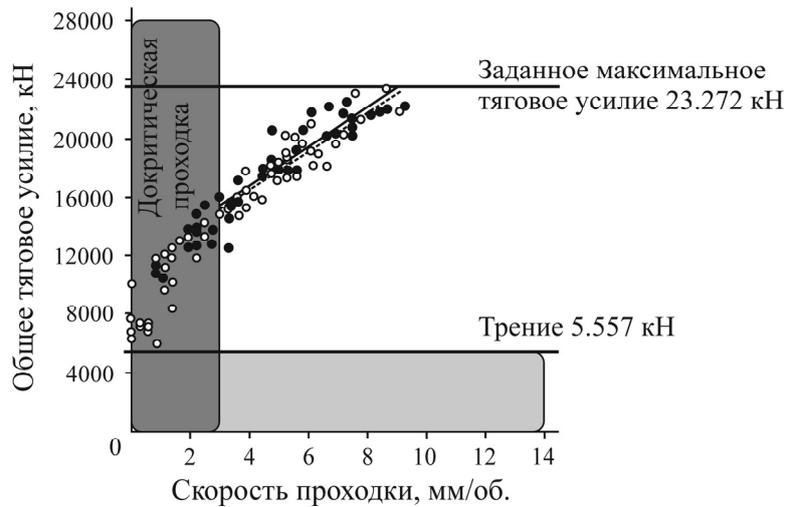


Рис. 2. Зависимость скорости проходки ТПК от общих тяговых усилий

Угол дуги контакта ϕ , давление в области контакта P' и нормальное усилие на резец F_N рассчитываются по формулам:

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R - P}{R} \right), \quad P' = c \sqrt[3]{\frac{\sigma_u^2 \sigma_t s}{\phi \sqrt{RT}}}, \quad F_N = \frac{TR\phi P' \cos(\phi / 2)}{1000},$$

где R — радиус резца; P — скорость проходки; c — постоянная резания; σ_u — прочность на одноосное сжатие; σ_t — прочность на растяжение по бразильскому методу; s — расстояние между резцами; T — ширина прохода резца.

Наиболее распространенные модели прогнозирования проходки ТПК — CSM-модель и модель Геринга [28]. Модель Геринга сформировалась при реализации проектов по прокладке тоннелей конкретным ТПК (диаметр резца 42.5 см, расстояние между резцами 80 мм). Линейная зависимость скорости проходки от нормального усилия на резец с учетом независимых корректирующих факторов, включающих свойства породного массива, тип режущей головки и геометрические параметры, имеет вид: $P = (F_N / \sigma_u) k_0 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5$. Здесь k_0 — корректирующий фактор; фактор k_1 учитывает удельную энергию разрушения, k_2 — строение массива породы, k_3 — напряженно-деформированное состояние массива, k_4 — диаметр резца, k_5 — интервал между резцами. В данной модели не принимается во внимание удельная энергия разрушения породы и нарушения сплошности в массиве.

МОДЕЛЬ ДЕ МУРА И БАТТА

В [5] представлена модель прогнозирования производительности бурения. В ее основе лежит линейная зависимость между постоянной буримости модели Маурера k и осевой нагрузкой, определяемой с помощью бурения kernовым долотом в естественной гранитной породе. Постоянная буримости для каждой экспериментальной точки вычисляется как

$$k = \frac{60RS^2}{N} \left[\frac{d_b}{W - W_0} \right]^2,$$

где R, N — скорость проходки и вращения; S — прочность породы; d_b — диаметр буровой коронки; W — осевая нагрузка на коронку; W_0 — пороговая осевая нагрузка на коронку до начала бурения, определяемая трением щита ТПК о породу.

Зависимость между постоянной буримости модели Маурера и осевой нагрузкой есть линейное уравнение буримости:

$$k = aW + b. \tag{1}$$

Здесь a — коэффициент буримости; b — свободный член. Величины a, b определяются по зависимости постоянной буримости от осевой нагрузки (рис. 3), скорость проходки — по уравнению, в котором наблюдается кубическая зависимость скорости проходки от осевой нагрузки:

$$R = (aW + b) \left[\frac{N(W - W_0)^2}{60d_b^2 S^2} \right], \quad W > W_0. \tag{2}$$

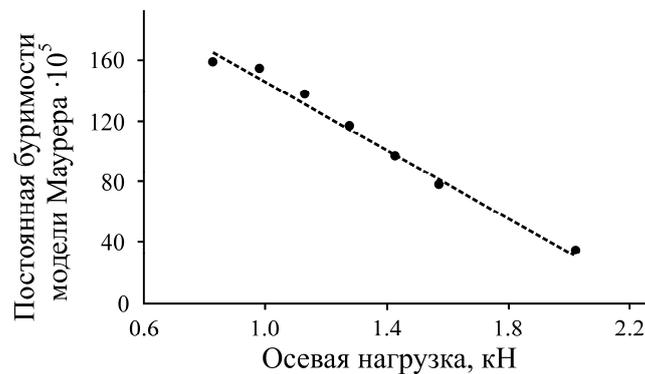


Рис. 3. Зависимость постоянной буримости модели Маурера от осевой нагрузки

При измерении дисперсии фактических данных и точности прогнозирования производительности бурения использовались следующие четыре параметра:

— для определения точности прогнозирования скорости проходки относительно фактического значения — наклон линейной аппроксимирующей кривой, построенной по методу наименьших квадратов с фиксированным началом координат в точке (0, 0):

$$\alpha = \frac{\sum(x_i y_i)}{\sum(x_i^2)}, \tag{3}$$

x_i, y_i — спрогнозированная и фактическая скорость проходки. Если $\alpha > 1$, то спрогнозированная скорость проходки ниже фактического значения, при $\alpha < 1$ — выше фактического;

— для измерения дисперсии данных вокруг спрогнозированных значений — коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\gamma x_i + \beta - y_i)^2}{\sum(y_i - \text{average}(y))^2}; \tag{4}$$

стандартная ошибка оценки:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum(y_i^2) - \beta \sum(y_i) - \sum(x_i y_i)}{n - 2}}; \tag{5}$$

относительная стандартная ошибка оценки:

$$SR_{y,x} = \frac{S_{y,x}}{\sum(x_i)}, \tag{6}$$

где γ , β — параметры линейной регрессии данных x_i ; n — количество данных. Коэффициент детерминации показывает, насколько близка фактическая скорость проходки к спрогнозированным значениям. Он описывается простой моделью линейной статистической регрессии.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ДЕ МУРА И БАТТА ДЛЯ БУРЕНИЯ БОЛЬШИМ ДИАМЕТРОМ

Проанализированы некоторые результаты натуральных испытаний ТПК и УБВ, а также результаты бурения керновым долотом для оценки комплексности модели Де Мура и Батта по прогнозированию производительности бурения большим диаметром. Данные взяты из исследований, доступных в научной литературе. Точность модели оценивалась по уравнениям (3)–(6).

ТПК с 80 дисковыми резцами диаметром 43.18 см в крайне твердой породе. В [28] выполнен сравнительный анализ между фактическими скоростями проходки ТПК и значениями, спрогнозированными моделями Геринга, CSM и Alpine. Количество резцов в ТПК снижено с 80 до 78, так как при нормальной эксплуатации нагрузка на дисковые резцы распределяется неравномерно, контакт между массивом и дисковыми резцами отличается в зависимости от местоположения роторного рабочего органа. Комплекс эксплуатировался в крайне твердых породных формациях с прочностью на одноосное сжатие 122, 125 и 144 МПа.

Для применения модели Де Мура и Батта в соответствии с данными эксплуатации ТПК [28] необходимо учитывать некоторые аспекты. Осевая нагрузка рассчитывается путем умножения нормального усилия на дисковый резец на число резцов (78 ед.), скорость проходки вычисляется с учетом скорости вращения 3 об./мин и диаметра роторного рабочего органа 10 м. Эти допущения не влияют на результаты анализа, так как постоянны.

На рис. 4а показана скорость проходки ТПК с учетом описанных допущений для модели Де Мура и Батта. Докритическая проходка (зона поверхностного и объемно-усталостного разрушения) находится в диапазоне 5000–8000 кН. Так как участок механизма бурения докритической проходки отличается от остальных участков, в последующем анализе он не рассматривался. Точка трения в уравнении (2) — W_0 . Постоянная буримости модели Маурера имеет почти линейную зависимость от осевой нагрузки (рис. 4б), что согласуется с утверждениями в [5]. На основе этой зависимости с помощью (1) определяются коэффициент буримости и свободный член уравнения буримости.

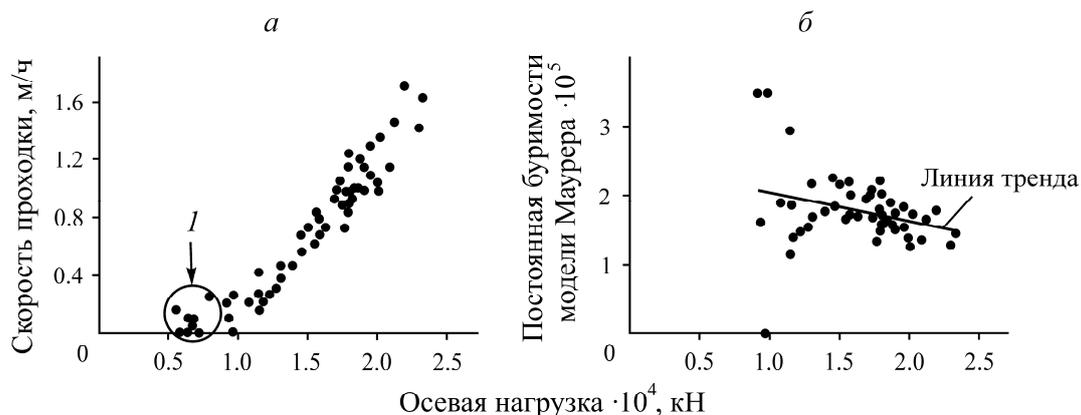


Рис. 4. Зависимость фактической скорости проходки ТПК (а) и постоянной буримости от осевой нагрузки (б) при эксплуатации ТПК с 80 резцами в условиях крайне твердой породы: *I* — докритическая проходка (зона поверхностного и объемно-усталостного разрушения); точками обозначены отфильтрованные данные

После определения постоянных величин для уравнения (2) находятся прогнозируемые скорости проходки для данных по бурению. В результате сравнения значений фактической скорости проходки и спрогнозированной по уравнению (2) выявлено, что чем ближе сплошная линия, соответствующая равенству сравниваемых величин ($\alpha = 1$), к штриховой, являющейся прямой, аппроксимирующей полученным данным, которая определяется значением α , тем выше точность модели прогнозирования (рис. 5). Модель Де Мура и Батта обладает высокой точностью ($\alpha = 0.9939$) и способна прогнозировать производительность бурения с низкой дисперсией данных: $R^2 = 0.9215$, $S_{y,x} = 0.136$ м/ч, $SR_{y,x} = 16.92\%$.



Рис. 5. Корреляция фактической скорости проходки ТПК с 80 резцами в условиях крайне твердой породы и спрогнозированной по уравнению (2)

УБВ диаметром 1.5 м в твердой породе. В [6] изучено экспериментальное бурение трех скважин при прокладке разведочного тоннеля в г. Олкилуото (Финляндия). Глубина скважин 7.5 м, диаметр 1.5 м. Бурение осуществлялось в породах с прочностью на сжатие 80 МПа в две стадии: пилотное ($\varnothing 31.5$ см), расширяющее ($\varnothing 1.5$ м). Скважины бурились УБВ Subterranean-005L-137 с максимальным тяговым усилием 630 кН и максимальной скоростью вращения 98 об./мин.

На рис. 6а представлена скорость бурения 1.5 м УБВ в твердой породной формации. Осевая нагрузка — общая тяга, приложенная к режущей коронке, скорость проходки — продвижение [6]. Постоянная буримости модели Маурера обладает линейной зависимостью от осевой нагрузки (рис. 6б). На основе этой зависимости с помощью (1) определяется коэффициент буримости и свободный член уравнения буримости.

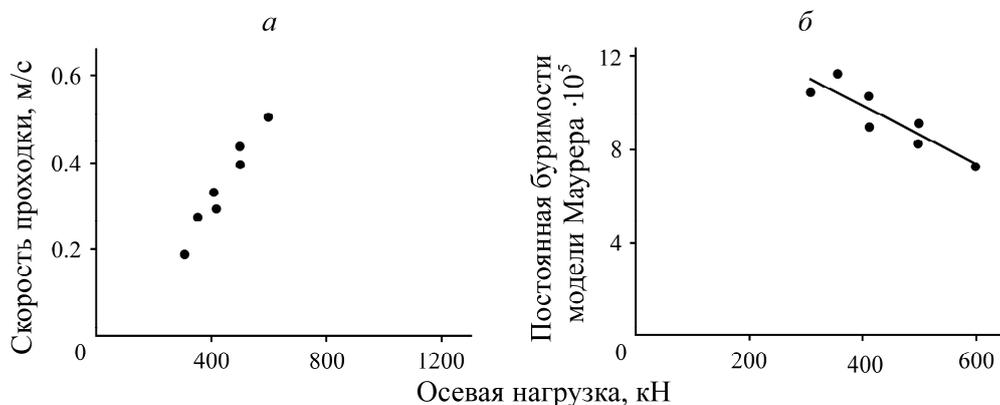


Рис. 6. Фактические зависимости скорости проходки УБВ (а) и постоянной буримости от осевой нагрузки (б) при натуральных испытаниях УБВ диаметром 1.5 м

На рис. 7 приведено сравнение между фактическими скоростями проходки и спрогнозированными по уравнению (2). Чем ближе сплошная линия, соответствующая $\alpha = 1$, к штриховой ($\alpha = 0.9981$), тем выше точность модели прогнозирования. Модель Де Мура и Батта обладает высокой точностью ($\alpha = 0.9981$) и способна прогнозировать производительность бурения с низкой дисперсией данных: $R^2 = 0.9861$, $S_{y,x} = 0.014$ м/ч, $SR_{y,x} = 2.98\%$.

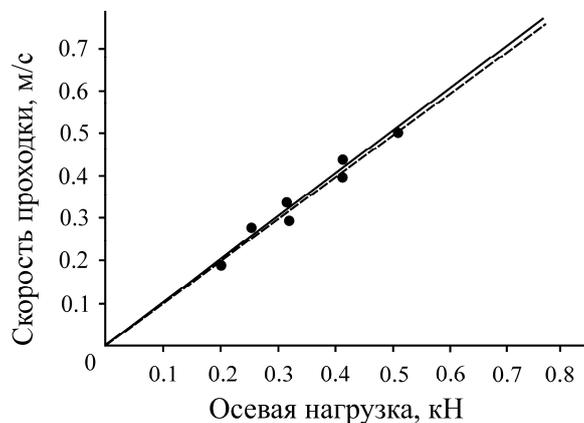


Рис. 7. Корреляция между фактической скоростью проходки УБВ диаметром 1.5 м в твердой породной формации и спрогнозированной по уравнению (2)

Для оценки точности модели Де Мура и Батта в таблице представлены 19 случаев проходки выработок больших диаметров, включая два приведенные.

Комплексная оценка уравнения (2)

Эксперимент	d_b , мм	Машина	Порода	σ_u , МПа	R^2	α	$S_{y,x}$, м/ч	$SR_{y,x}$, %	Источник
1	2600	УБВ	Сланец и базальт	84.6	0.2126	1.0261	1.318	84.07	[29]
2	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9861	0.9990	0.014	2.97	[12]
3	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9676	1.0262	0.016	2.95	[12]
4	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9867	1.0018	0.046	6.76	[12]
5	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9981	1.0007	0.024	4.91	[12]
6	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9667	0.9981	0.011	3.06	[12]
7	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9609	1.0067	0.076	15.06	[12]
8	1500	УБВ	Кварц	175.0	0.9996	0.9999	0.003	0.49	[12]
9	1060	УБВ	Гранитный гнейс	244.0	0.9944	0.9976	0.150	6.34	[30]
10	2134	УБВ	Гранодиорит	150.0	0.9985	0.9944	0.068	9.27	[30]
11	660	УБВ	Сиенит	150.0	0.0683	1.0009	1.091	36.17	[30]
12	1524	УБВ	—	224.1	0.0017	1.0000	0.231	18.83	[31]
13	2600	УБВ	Базальт	81.6	0.1928	1.0162	1.397	88.06	[32]
14	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.9212	1.0051	0.136	16.92	[28]
15	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.8059	1.0262	0.251	27.66	[28]
16	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.8885	1.0077	0.195	17.48	[28]
17	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.9082	0.9857	0.046	4.38	[28]
18	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.6404	0.9998	0.263	16.08	[28]
19	10000*	ТПК	Гнейс	122.0	0.7996	0.9994	0.138	9.31	[28]
Среднее					0.7525	1.0048	0.288	19.51	
Среднеквадратическое отклонение					0.3411	0.0109	0.435	24.52	

Примечание: σ_u — прочность на одноосное сжатие.

Выполнен анализ эксплуатации ТПК и УБВ в диапазоне прочности на одноосное сжатие 81.6–224.1 МПа. Комплексная оценка уравнения (2) — сложная задача из-за низкой надежности и точности данных каждого доступного в литературе примера бурения. Однако обобщенный анализ — эффективный показатель точности по прогнозированию производительности бурения. Установлено, что уравнение (2) обладает высокой точностью прогнозирования производительности ТПК и УБВ даже в условиях высокой дисперсии данных. В обобщенном виде средняя точность модели Де Мура и Батта составила 1.0048 при среднеквадратическом отклонении 0.0109. Наибольшая дисперсия данных наблюдается в эксперименте 12: $R^2 = 0.0017$, $S_{y,x} = 0.231$ м/ч, $SR_{y,x} = 18.83\%$. Несмотря на высокую дисперсию данных, уравнение (2) имеет высокую точность прогнозирования скорости бурения (1.000). Наименьшая точность использования уравнения (2) фиксируется в эксперименте 15 ($\alpha = 1.0262$), что связано с относительно высокой дисперсией данных: $R^2 = 0.8059$, $S_{y,x} = 0.251$ м/ч, $SR_{y,x} = 27.66\%$. На рис. 8 показано сравнение фактических скоростей проходки и спрогнозированных по уравнению (2) для обоих случаев. Сплошная линия на рис. 8б соответствует линейной зависимости с $\alpha = 1$, штриховая — со значением $\alpha = 1.0262$, полученном в эксперименте.



Рис. 8. Корреляция фактической скорости проходки и спрогнозированной по уравнению (2) для экспериментов 12 (а) и 15 (б) из таблицы

В [28] сравниваются CSM-модель и модель Геринга с фактическими данными производительности ТПК. Основываясь на этих данных, а также на принятых допущениях, выполнен сравнительный анализ между рассматриваемыми моделями и моделью Де Мура и Батта. На рис. 9а показаны результаты применения модели Де Мура и Батта, CSM-модели и модели Геринга при анализе фактических значений производительности ТПК в очень твердой породной формации (прочность на одноосное сжатие 122 МПа) при силе трения 3805 кН. Фактические скорости проходки и спрогнозированные CSM-моделью и моделью Геринга взяты из [28]. Видно, что CSM-модель занижает, а модель Геринга завышает скорости проходки рассмотренного ТПК, что выражается в низкой точности прогнозирования, тогда как модель Де Мура и Батта показывает высокую точность. На рис. 9б приведено сравнение модели Де Мура и Батта, CSM-модели и модели Геринга относительно фактических значений скорости проходки ТПК в очень твердой породной формации (прочность на одноосное сжатие 122 МПа) при силе трения 3523 кН. Модель Геринга и CSM-модель дают низкую точность прогнозирования производительности бурения, занижая скорости проходки, тогда как модель Де Мура и Батта — высокую точность прогнозирования.

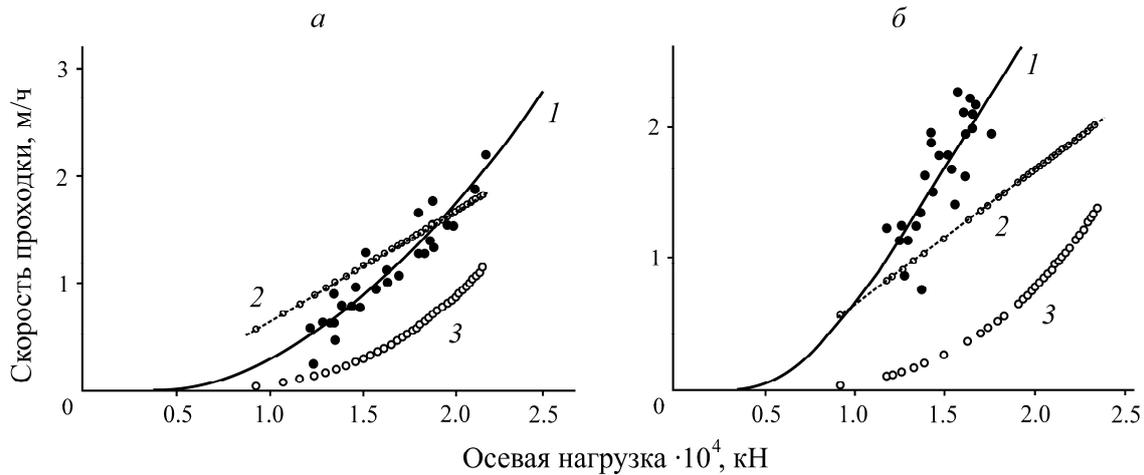


Рис. 9. Корреляция фактической скорости (обозначена точками) проходки ТПК с 80 резцами в условиях твердой породы при силе трения 3805 (а) и 3523 кН (б) и спрогнозированных значений разными моделями: 1 — модель Де Мура и Батта; 2 — модель Геринга; 3 — CSM-модель

Точка перегиба — наиболее значимый фактор при построении кривой скорости бурения. В рамках нефтегазового бурения существование точки перегиба доказано и исследовано. Она позволяет сравнивать процессы бурения с различными технологическими и эксплуатационными параметрами. Ее существование при бурении большим диаметром является неисследованной областью ввиду ограничений, связанных с бурильными установками и дисковыми резцами. Так как точка перегиба — точка локального максимума на кривой производительности бурения, ее местоположение выявляется только с приложением наибольшего тягового усилия для конкретного процесса бурения, которое обычно выше максимально допустимой нагрузки на оборудование.

На рис. 10 показана точка перегиба на двух отдельных кривых скорости бурения УБВ: бурение УБВ в формации, состоящей из черного сланца и подводного базальта (прочность на одноосное сжатие 84.57 МПа) с диаметром режущей коронки 2.60 м (рис. 10а); бурение УБВ в формации сиенита (прочность на одноосное сжатие 150 МПа) с диаметром режущей коронки 0.66 м (рис. 10б) [29, 30].

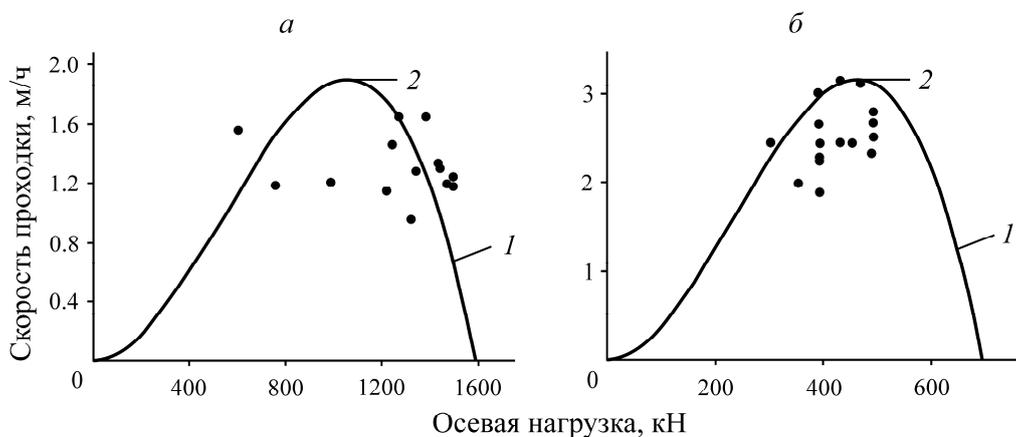


Рис. 10. Корреляция обозначенной точками фактической скорости проходки УБВ диаметром 2.60 (а) и 0.66 м (б) и спрогнозированных значений с помощью модели Де Мура и Батта (1), включая точки перегиба (2)

ВЫВОДЫ

В ходе прогнозирования производительности бурения представительного числа случаев эксплуатации ТПК и УБВ при высокой дисперсии данных показана комплексная эффективность модели Де Мура и Батта для бурения большим диаметром. Линейная зависимость между постоянной буримости модели Маурера и осевой нагрузкой выполняется при бурении большим диаметром, позволяя успешно применять модель Де Мура и Батта для подобных случаев.

Проведено сравнение модели Де Мура и Батта с CSM-моделью и моделью Геринга на примере двух вариантов эксплуатации ТПК. Модель Де Мура и Батта продемонстрировала высокую точность прогнозирования. Для представленных случаев применения УБВ рассмотрено существование точки перегиба на кривой производительности бурения большим диаметром. Однако точное доказательство существования точки перегиба требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zheng Y. L. and Zhang Q. B. Z. J.** Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining, *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2016, Vol. 57. — P. 287–299.
2. **Barla G. and Pelizza S.** TBM tunnelling in difficult ground conditions, *An Int. Conf. Geotech. Geol. Eng.*, Melbourne, 2000 — P. 20.
3. **Graham P. C.** Rock exploration for machine manufacturers, *Explor. Rock Eng.*, Johannesburg, 1976. — P. 173–180.
4. **Farmer I. W. and Glossop N. H.** Mechanics of disk cutter penetration, *J. Tunnels Tunnel. Int.*, 1980, Vol. 12, No. 6. — P. 22–25.
5. **De Moura J., Yang J., and Butt S. D.** Physics-based rate of the penetration prediction model for fixed cutter drill bits, *ASME, J. Energy Res. Technol.*, 2020, Vol. 143, No. 5. — P. 1–12.
6. **Autio J. and Kirkkomaki T.** Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring method, *Posiva*, Helsinki, 1996. — 130 p.
7. **Hedayatzadeh M., Shahriar K., and Hamidi J. K.** An Artificial Neural Network model to predict the performance of hard rock TBM, *6th Asian Rock Mech. Symp., Advances Rock Eng.*, New Delhi, 2010. — P. 23–27.
8. **Hassanpour J., Rostami J., and Zhao J.** A new hard rock TBM performance prediction model for project planning, *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2011, Vol. 26. — P. 595–603.
9. **Yagiz S., Rostami J., and Ozdemir L.** Colorado school of mines approaches for predicting TBM performance, *Rock Eng. Technol. Sustainable Underground Construction Eurock, ISRM Int. Symp.*, Stockholm, 2012, Vol. 1.
10. **Ozdemir L.** Development of theoretical equations for predicting tunnel borability, *Colorado School Mines*, Golden, 1977.
11. **Rostami J. and Ozdemir L.** A new model for performance prediction of hard rock TBMs, *Proc. Rapid Excav. Tunnel. Conf.*, Boston, 1993. — P. 793–810.
12. **Yagiz S.** Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines, *Colorado School Mines*, Golden, 2002. — 289 p.
13. **Yagiz S.** A model for prediction of tunnel boring machine performance, *10th IAEG Congress*, Nottingham, 2006. — P. 1–10.
14. **Hegde C., Daigle H., Millwater H., and Gray K.** Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-base and data-driven models, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2017, Vol. 159, No. 1. — P. 295–306.

15. **Ge Y., Wang J., and Li K.** Prediction of hard rock TBM penetration rate using least square support vector machine, 13th IFAC Symp. Large Scale Complex Systems: Theory and Applications, Shanghai, 2013.
16. **Ghasemi E., Yagiz S., and Ataei M.** Predicting penetration rate of hard rock tunnel boring machine using fuzzy logic, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2014, Vol. 73. — P. 23–35.
17. **Ataei M., Kakaie R., Ghavidel M., and Saeidi O.** Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 73. — P. 130–138.
18. **Mamaghani A. S., Avunduk E., and Bilgin N.** Rock mechanical aspects of excavation related to raise boring machine — A typical example from Asikoy underground mine, Kastamonu, Turkey, *ISRM Symp. Eurock 2015, 64th Geomech. Colloquium, Salzburg*, 2015. — P. 1–7.
19. **Rostami J.** Performance prediction of hard rock tunnel boring machines (TBMs) in difficult ground, *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2016, Vol. 57. — P. 173–182.
20. **Adoko A. C., Gokceoglu C., and Yagiz S.** Bayesian prediction of TBM penetration rate in rock mass, *J. Eng. Geol.*, 2017, Vol. 226. — P. 245–256.
21. **Salimi A., Rostami J. M. C., and Hassanpour J.** Examining feasibility of developing a rock mass classification for hard rock TBM application using non-linear regression, regression tree and generic programming, *J. Geotech. Geol. Eng.*, 2018, Vol. 36. — P. 1145–1159.
22. **Shaterpour-Mamaghani A., Copur H., Dogan E., and Erdogan T.** Development of new empirical models for performance estimation of a raise boring machine, *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2018, Vol. 82. — P. 428–441.
23. **Armeti G., Migliazza M. R., Ferrari F., Berti A., and Padovese P.** Geological and mechanical rock mass conditions for TBM performance prediction. The case of “La Maddalena” exploratory tunnel, chiomonte (Italy), *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2018. — P. 115–126.
24. **Arbabsiar M. H., Farsangi M. A. E., and Mansouri H.** A new model for predicting the advance rate of a tunnel boring machine (TBM) in hard rock conditions, *Min. Geol. Petroleum Eng. Bull.*, 2020, Vol. 35, No. 2. — P. 57–74.
25. **Samaei M., Ranjbarnia M., Nourani V., and Naghadehi M. Z.** Performance prediction of tunnel machine through developing high accuracy equations: A case study in adverse geological condition, *J. Measurement*, 2020, Vol. 152. — P. 107–244.
26. **Chen X., Yang J., and Gao D.** Drilling performance optimization based on mechanical specific energy technologies, *Drilling*, 2018, Vol. 1. — P. 133–162.
27. **Khorshidian H., Butt S. D., and Arvani F.** Influence of high velocity jet on drilling performance of PDC bit under pressurized condition, 48th US Rock Mechanics, Geomech. Symp. ARMA, Minneapolis, 2014.
28. **Wilfing L., Käsling H., and Thuro K.** Improvement of penetration prediction in TBM-Tunneling by performing on-site penetration tests, 13th Int. Congr. Rock Mech., Montreal, 2015. — 618 p.
29. **Shaterpour-Mamaghani A., Bilgin N., Balci C., and Avunduk E.** Predicting performance of raise boring machines using empirical models, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49. — P. 3377–3385.
30. **Lislerud A. and Vainionpää P.** Application of raiseboring for excavating horizontal tunnels with Rhino machines, *Posiva*, Helsinki, 1997.
31. **Seller T. W. K.** Hard rock boring with tungsten carbide insert big hole cutters, 12th US Symp. Rock Mech. USRMS, Rolla, 1970.
32. **Shaterpour-Mamaghani A. and Bilgin N.** Some contributions on the estimation of performance and operational parameters of raise borers — A case study in Kure copper mine, Turkey, *J. Tunnel. Underground Space Technol.*, 2016, Vol. 54. — P. 37–48.

Поступила в редакцию 19/IV 2021

После доработки 04/XI 2022

Принята к публикации 19/I 2023