

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 1

УДК 534.013; 622.24; 622.23.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО И УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ПОРОД**

В. А. Коронатов

*Братский государственный университет,
E-mail: kortavik@mail.ru, ул. Макаренко, 40, 665709, г. Братск, Россия*

Приведены две одномассовые модели бурильной колонны с разными способами воздействия на породу в забое: ударным и ударно-вращательным. Нагрузки, создаваемые ударником, передаются на породу через поступательно движущееся долото у первой модели и с возможностью вращения — у второй. Сила лобового сопротивления, действующая на долото, устанавливается в нелинейной зависимости от скорости погружения и кинематических величин, определяющих силовое воздействие на породу и влияющих на потерю ее прочности: начальной скорости ударов и модуля угловой скорости вращения долота. Найдены оптимальные начальные скорости ударов на заданной частоте их нанесения, обеспечивающие отсутствие возможностей кратковременных остановок-заклиниваний в погружении долота. Для указанных случаев погружения математически строго описан процесс ударного и ударно-вращательного бурения твердых пород. Приведены результаты численного моделирования.

Ударное бурение, ударно-вращательное бурение, бурильная колонна, сопротивление грунтовой среды, разрушение горных пород

DOI: 10.15372/FTPRPI20240108
EDN: AHBALH

При моделировании проникания твердого тела в грунт или твердую горную породу основными являются прочностные свойства среды, зависящие от создаваемого силового воздействия. Силовое влияние может быть непрерывным, например в результате действия вращающимся долотом при бурении, и импульсивным — при ударах. Указанные силовые воздействия предлагается определять не напрямую, а косвенно — из предположения, что они прямо пропорциональны модулю угловой скорости долота и начальной скорости удара. Их следует учитывать при нахождении силы лобового сопротивления. При силовом воздействии в опорной среде возникают микро- и макротрешины, нарушающие целостность среды, а значит, и ее прочность. Увеличение числа и размеров трещин может привести к уменьшению силы лобового сопротивления и, как следствие, к началу проникания тела в грунт. Такая возможность определяется через динамическое предельно-допустимое напряжение, которое, в отличие от статического, должно учитывать динамику силового воздействия. Сила лобового сопротивления играет здесь определяющую роль.

Существующие попытки определения силы лобового сопротивления через квадратичную зависимость (от скорости проникания) или рациональную дробь (от скорости погружения и частоты вращения долота [1–5]) малоэффективны. Не удавалось моделировать даже простейшие безостановочные режимы погружения бурильной колонны (БК) в перечисленных случаях, а также при попытках учитывать только боковое сухое трение [6–8]. Функции с запаздывающим аргументом позволяли это делать, но только с долотом режущего типа и для установившихся режимов бурения [5, 9–11]. Для учета динамики погружения БК вынуждены были прибегать к эмпирическим соотношениям, выражающим зависимость скорости погружения БК от коэффициента, учитывающего прочностные свойства породы, силы осевого давления на долото и частоты его вращения [4, 12–14].

Аппроксимацию Паде первой степени [15], применяемую в механике для нахождения силы трения при скольжении тел с верчением [16], предложено использовать при определении силы лобового сопротивления [17]. Это позволяет, сохраняя нелинейную зависимость от скорости погружения, учитывать влияние силового воздействия долота любого типа на прочностные свойства грунта [17, 18] и использовать указанные кинематические величины, характеризующие силовые воздействия. Такая сила сопротивления является силой, дающей возможность моделировать эффекты stick-slip, что ранее делалось только с помощью бокового сухого трения без учета погружения БК. Результаты моделирования бурения теперь можно получать из решений обыкновенных дифференциальных уравнений, без использования каких-либо эмпирических соотношений. Принимаемые модели дают возможность находить законы изменения глубины и скорости погружения БК, обнаруживать периодические и хаотичные режимы бурения, учитывать эффекты stick-slip [17, 18].

Аппроксимация Паде хорошо зарекомендовала себя при моделировании крутильных и крутильно-продольных автоколебаний БК, создании элементарной теории проникания ударника в грунт при однократном ударе [17–21]. Новый подход используется в данной работе с учетом ранее полученных результатов.

Надо признать, что теорий ударного и ударно-вращательного бурения в настоящее время нет. Отсутствуют и общепризнанные модели для изучения данного процесса. Имеются лишь исследования, например [22–26], с экспериментальными данными и описанием конкретных моделей ударников. В них приводятся эмпирические соотношения, характеризующие работу ударника отдельно от БК, без учета влияния друг на друга их работы и возможности описания возникающих динамических процессов в целом.

В настоящем исследовании на примере упрощенной одномассовой модели БК математически строго описывается процесс ударного и ударно-вращательного бурения твердых пород, при котором импульсное воздействие, создаваемое ударником, передается на породу через долото. Выделяются случаи, когда кратковременные остановки в погружении долота отсутствуют. Чтобы исключить возможные остановки – заклинивания в погружении, нужно дополнительного определять необходимую для этого начальную скорость наносимых ударов по заданной частоте их нанесения. Приведены результаты численного моделирования для принятых моделей БК.

ОБ УДАРАХ И ВОЗДЕЙСТВИИ ИХ НА ПОРОДУ

Следует подчеркнуть, что применяемая стереомеханическая теория Ньютона [27, 28] не позволяла определять силу ударов или их влияние на изменение прочности грунта. Не обсуждался вопрос и о том, как удар одного твердого тела передается через другое, нижележащее, твердое тело на грунт. Обычно считается, что нижележащее тело под действием удара обязательно начнет погружаться в грунт [8, 28, 29], без каких-либо обоснований этого.

Предложенная элементарная теория проникания ударника в грунт при однократном ударе позволяет находить ответы на указанные вопросы [19–21]. Влияние текущего удара на прочность среды предлагается оценивать через сравнение его с действием вводимого эталонного удара по их начальным скоростям. Появилась возможность заранее определять при каком ударе осуществимо начало проникания, при каком — нет. Можно находить и начальную скорость погружения долота для послеударного движения, необходимую для установления начальных условий при решении дифференциальных уравнений проникания. Полученные ранее результаты элементарной теории проникания ударника в грунт легли в основу настоящего исследования, где используются следующие определения для ударов разной силы [19]:

- холостой удар — по своей силе еще недостаточно сильный для начала проникания долота в грунт;
- эффективный удар — приводящий к началу проникания долота в грунт;
- эталонный удар — разделяет между собой холостые и эффективные удары, являясь наибольшим по силе (начальной скорости) из возможных холостых ударов.

Приведем также и используемые в элементарной теории проникания основные положения:

1. Кинетическая энергия удара твердого тела о грунтовую среду (породу) при значительной потере ее прочности переходит в потенциальную энергию упругих деформаций в области возникновения трещин и начальную кинетическую энергию проникания (погружения) тела.
2. При недостаточной потере прочности кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную энергию упругих деформаций близлежащей среды образования трещин.
3. О потере прочности породы можно судить, сравнивая возникающее напряжение в области удара с динамическим предельно-допустимым, учитывая динамику силового воздействия.
4. Сила удара считается прямо пропорциональной его начальной скорости.
5. Влияние текущего удара на прочность среды находится сравнением его с действием вводимого эталонного удара по их начальным скоростям.
6. Возможность или невозможность начала погружения долота в грунт после нанесенного удара определяется через сравнение начальных скоростей наносимого и эталонного ударов для этого тела.
7. Начальная скорость погружения долота в породу вычисляется как разность между начальными скоростями эффективного и эталонного ударов (что может иметь строгое обоснование в рамках теории Герца [27, 28]).

МОДЕЛИ УДАРНОГО И УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ

На рис. 1 a представлена одномассовая модель бурильной колонны с ударным способом бурения, на рис. 1 b — с ударно-вращательным. Удары создаются ударником и передаются на породу через породоразрушающий инструмент — долото, которое для первой модели имеет возможность погружаться без вращения, для второй — с вращением. Такие удары предложено для первой модели называть прямыми, для второй — комбинированными, так как одно из соударяемых тел (долото) имеет вращательную составляющую движения. К верхнему сечению БК приложена постоянная сила давления P , направленная вдоль оси БК вниз. Для первой модели это сечение, как и вся БК, может двигаться только поступательно (рис. 1 a), на второй — оно закручивается с постоянной угловой скоростью ω (рис. 1 b). По аналогии с ранее принятой моделью БК [17], учитывается только масса нижней утяжеленной трубы, жестко связанной с долотом дробяще-скользящего действия. Они имеют общую массу m и осевой момент инерции I ; m_1 — масса бойка ударника, присоединенного к этой трубе. Невесомая верхняя

часть БК у первой модели считается абсолютно жесткой, у второй — наделяется упругими свойствами пружины кручения жесткости c_ϕ . Возникновение продольных деформаций у БК полностью исключается. Удары ударника о долото считаются упругими, удары долота о породу — пластическими, отскок долота от породы предотвращается прижимной силой P . Удары наносятся ударником через заданные постоянные промежутки времени Δt с одинаковой начальной скоростью V_{l-} , которая подлежит определению; V_- — передаваемая начальная скорость удара долота о породу.

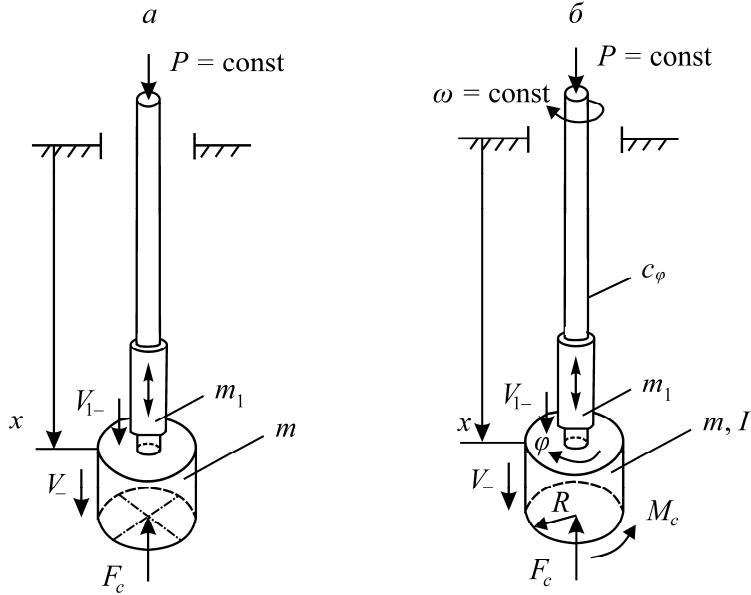


Рис. 1. Модель бурильной колонны при ударном (a) и ударно-вращательном способе бурения (б)

Бурильная колонна считается прямолинейной и состоит из труб меньшего диаметра, чем долото, что исключает боковое трение о стенки скважины. Первая модель БК (рис. 1a) также используется для предварительного нахождения оптимальных параметров ударно-вращательного бурения. Модели вводятся для описания безостановочного режима погружения БК при бурении твердых пород. Для первой модели сила лобового сопротивления, действующая на долото, равна [19, 21]:

$$F_c = F_0 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + b_1 V_- e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta}, \quad (1)$$

для второй модели (рис. 1б) [18]

$$F_c = F_0 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\phi}| + b_1(V_- + aR|\Omega_-|)e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta}. \quad (2)$$

Здесь F_0 — максимальное значение силы, подлежащее определению; b, b_1, a, Δ — коэффициенты аппроксимации, находящиеся экспериментально, первые три из них определяют степень потери прочности породы в результате образования трещин в продольном направлении соответственно от непрерывного и импульсивного силового воздействия (предполагается, что $b_1 = b/a$); ϑ — коэффициент затухания, характеризующий быстроту восстановления прочностных свойств грунта по мере удаления от места удара; R — радиус долота для второй модели; $\dot{x}, \dot{\phi}$ — соответственно продольная координата и угол поворота, определяющие положение долота; “точкой” обозначается дифференцирование по времени t .

Для упрощения расчетов считается, что дробяще-скалывающее действие долота на породу в среднем непрерывно. Действие каждого зубца шарочки начинается сразу же после окончания действия ранее активного зубца, без задержек по времени. Такое непрерывное силовое воздействие на породу предполагается прямо пропорциональным модулю угловой скорости долота $\dot{\phi}$. Формулой (2) для силы лобового сопротивления выражена прямая пропорциональная зависимость от скорости погружения \dot{x} и обратная — от $|\dot{\phi}|$, что хорошо согласуется с данными промысловой практики [4, 5].

Кроме того, в (1) учтена сила прямого удара, которая считается прямо пропорциональной его начальной скорости V_- , в (2) — сила комбинированного удара, пропорциональная его начальной обобщенной скорости $V_- + aR|\Omega_-|$. Здесь V_- , Ω_- — начальные скорости составляющих соответственно прямого и вращательного комбинированного удара. Принимается во внимание следующее: $\Omega_- = \dot{\phi}_- = \dot{\phi}$ и находится через угловую скорость долота в момент удара; знак модуля означает, что разные направления вращения долота и вращательной составляющей удара не будут приводить к различиям в образовании трещин, уменьшающих прочность породы. Функция $e^{-\vartheta(x-x_0)}$ определяет предполагаемый закон затухания силы удара при удалении от места удара (x_0 — координата места нанесения последнего из нанесенных ударов). В формулах (1), (2) учитывается только последний удар из предположения быстрого затухания возникающих трещин, когда $\vartheta \gg 1$. Коэффициент пропорциональности находятся следующим образом [17, 18]:

$$F_0 = mg \begin{cases} kr, & \text{если } \dot{x} \equiv 0; \\ n_1, & \text{если } \dot{x} > 0, \end{cases}$$

где

$$k = \frac{1}{\Delta} \begin{cases} \left[b_1 V_- e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta \right], & \text{если } \omega \equiv 0; \\ \left[bR|\dot{\phi}| + b_1(V_- + aR|\Omega_-|)e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta \right], & \text{если } \omega \neq 0. \end{cases}$$

Здесь k — коэффициент динамичности, определяющий степень силового воздействия на породу, $r = 1 + P / (mg)$; $n_1 = \sigma_1 / \sigma_0$ — запас прочности породы от действия силы тяжести БК по нормальным напряжениям; σ_1 — предельно-допустимое напряжение данной породы; $\sigma_0 = mg / S_o$, S_o — площадь основания долота.

Момент сопротивления верчению долота (рис. 1б) можно найти согласно закону Кулона:

$$M_c = \rho F_c,$$

коэффициент верчения равен:

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 \operatorname{sign} \dot{\phi}, & \text{если } \dot{\phi} \neq 0; \\ \rho = [-\rho_1, \rho_1], & \text{если } \dot{\phi} \equiv 0, \left(\varepsilon_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_0} \geq 1 \right). \end{cases}$$

Момент сил упругости для второй модели со стороны пружины кручения, действующий на долото, определяется в линейном виде:

$$M_\varphi = -c_\varphi(\varphi - \omega t).$$

ОПТИМАЛЬНЫЕ УДАРЫ И РЕЖИМЫ БУРЕНИЯ

Оптимальным ударом будем называть такой удар, который по своей силе способен вызвать проникание долота в породу по продолжительности не менее отведенного на это времени (например, времени, разделяющего соседние удары). Допускается только незначительное пре-вышение такого времени, чтобы исключить возможности нанесения ударов большой силы, которые могут стать причиной поломки бурового инструмента или его преждевременного износа. Удары наименьшей силы, приводящие к безостановочному погружению БК, будут соот-ветствовать оптимальным режимам бурения с минимальными энергетическими затратами. При этом избегаются нежелательные эффекты stick-slip, при которых часто возникают аварий-ные ситуации и происходит заметное снижение производственных показателей. Нахождение безостановочных режимов погружения востребовано в промысловой практике и является одной из главных задач, которые ставятся при проектировании процессов бурения.

При моделировании безударных способов бурения, когда учитываются крутильные или крутильно-продольные колебания БК даже для простейших одно-двух массовых моделей, такие режимы заранее предусмотреть не удавалось [17, 18]. В случае роторного бурения эффекты stick-slip возникают обычно при низкочастотных автоколебаниях БК: вращение долота замед-ляется и его силовое воздействие на породу становится минимальным. Методов, чтобы преду-гадать и избежать такого действия пока не существует. Для более сложных случаев бурения (ударного и ударно-вращательного) нахождение оптимальных режимов становится возмож-ным: предварительно определяется оптимальная начальная скорость ударов, затем оценивается возможность нанесения таких ударов и временные промежутки между ними.

Для первой модели, где сила лобового сопротивления определяется согласно (1), опти-мальные режимы устанавливаются следующим образом. Начальная скорость для эталонного удара долота о грунт берется за начальное приближение для искомого оптимального удара. Постепенно увеличивая ее, при численном решении дифференциального уравнения проника-ния определяется время погружения долота от каждого такого удара по отдельности. Данное время должно быть не меньше времени, отделяющего два соседних удара. Как только время достигает нужного значения, фиксируется оптимальная начальная скорость удара. Для повы-шения точности расчетов предусматривалась возможность только жестких остановок долота, заканчивающихся микроударами, что должно проявляться в грунтах и твердых породах [21]. Сила такого микроудара будет прямо пропорциональна его начальной скорости и может быть не малой. Все зависит от прочностных свойств среды и динамики их потери через распроспра-няющиеся трещины. В непрочностных воздушных средах остановки происходят в мягком ре-жиме при непрерывном уменьшении скорости тела до нуля, что ошибочно было принято рас-пространять и на грунтовые среды [2, 3, 8, 12, 28, 29].

При ударно-вращательном бурении, где сила лобового сопротивления находится по фор-муле (2), вышесказанное сделать сложнее. Здесь удары комбинированные из-за вращения долота, а их сила зависит от обобщенной начальной скорости $V_- + aR|\Omega_-|$, на определение кото-рой влияет вращение долота по неизвестному заранее закону. Предлагается вместо нужной начальной обобщенной скорости комбинированного удара искать такую начальную ско-рость V_- для поступательной составляющей удара, при которой погружение долота начнется независимо от его вращения. Для этого делается предварительный расчет при отсутствии вра-щения долота, как при чисто ударном бурении. Затем по найденной V_- делается уточненный

расчет с учетом вращения долота. Здесь выход на безостановочный режим погружения БК будет гарантирован, так как $V_+ + aR|\Omega_-| \geq V_-$ при любой найденной скорости V_- и текущей Ω_- с условием, что время погружения БК от одного такого удара будет не меньше времени, определяемого через заданную частоту ударов, создаваемых ударником.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЕРЧЕНИЯ

При применении закона Кулона для задач классической механики верчение твердых тел обычно предполагает возникновение очень малых упругих деформаций в зоне контакта, а сами поверхности в таких зонах считаются гладкими и имеющими малые размеры. По опытным данным известно, что в таких случаях коэффициент трения верчения в сравнении с другими коэффициентами трения (качения и скольжения) очень мал [30–32], поэтому при расчетах твердых тел моментом верчения обычно пренебрегают.

При проведении буровых работ поверхности соприкосновения у тел верчения — долота и породы — будут далеко не малыми и не гладкими. От вращательного силового воздействия долота порода в забое может разрушаться, теряя свою целостность, а значит, и гладкость. Это свидетельствует о том, что величина момента верчения будет сравнима с другими силами сопротивления и ею пренебрегать будет уже нельзя. Коэффициент трения верчения здесь принимает не столь малые значения и может существенно отличаться от тех значений, которые приводятся в справочниках. Возникает необходимость в нахождении способа определения коэффициента верчения при моделировании процессов бурения.

Для этого предлагается делать следующее. Для долота в зоне контакта с породой выбирается контрольная точка, например на расстоянии R от оси верчения, где определяются:

- $F_{\tau 0} = c_\varphi / R$ — эталонная касательная сила, необходимая для закручивания нижнего конца пружины жесткости c_φ на угол в один радиан относительно верхнего сечения БК, т. е. когда $\varphi - \omega t = 1$;
- $\tau_0 = F_{\tau 0} / S$ — эталонное касательное напряжение, возникающее под действием эталонной касательной силы на выделяемой площадке S в зоне контакта;
- $F_\tau = F_{\tau 0}(\varphi - \omega t) = c_\varphi(\varphi - \omega t) / R$ — касательные силы, необходимые для поворота пружины жесткости c_φ на произвольный относительный угол закручивания $\varphi - \omega t$;
- $\tau = F_\tau / S = \tau_0(\varphi - \omega t)$ — касательное напряжение, появляющееся при действии силы F_τ на выделяемой площадке S в зоне контакта;
- $\tau_1 = \tau_0 |\varphi - \omega t|_{\max} = \tau_0 \rho_1 r m g / c_\varphi$ — предельно допустимое касательное напряжение, возникающее при максимально допустимом угле поворота $|\varphi - \omega t|_{\max} = \rho_1 r m g / c_\varphi$ в моменты окончания возможных кратковременных остановок закручивания [17] при отсутствии погружения БК.

При отсутствии погружения БК ($F_c = r m g$) запас прочности породы по касательным напряжениям в сравнении с эталонным напряжением τ_0 определяется как

$$n_{1\tau} = \frac{\tau_1}{\tau_0} \Rightarrow n_{1\tau} = \frac{\rho_1 r m g}{c_\varphi},$$

где величина $n_{1\tau}$ считается заранее известной по опытным данным.

Следовательно, коэффициенты покоя и верчения можно выразить через запас прочности породы по касательным напряжениям:

$$\rho_1 = \frac{c_\phi}{rmg} n_{1\tau}, \quad \rho_0 = \frac{c_\phi}{\varepsilon_\rho rmg} n_{1\tau}. \quad (3)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО БУРЕНИЯ

Для первой модели (рис. 1а), согласно (1), силовое воздействие на породу создается прямым ударом, сила которого прямо пропорциональна начальной скорости V_- наносимого удара. Других воздействий на породу здесь не предусматривается. Определим необходимые начальные скорости для таких прямых ударов, чтобы погружение долота не прекращалось на временных интервалах Δt , отделяющих один удар от другого. Промежуток времени Δt между соседними ударами будем считать постоянным и заданным.

Воздействие ударника с начальной скоростью V_{1-} приводит к удару долота с начальной скоростью V_- о породу в забое. Долото, жестко связанное с нижней утяжеленной трубой, выступает в роли тела, передающего удар ударника на породу. В зависимости от силы такого удара возникшие трещины могут привести к достаточно сильному уменьшению прочности породы или нет. Долото после удара в первом случае начнет погружаться в опорную среду, во втором — погружение будет невозможным. Нас интересуют случаи погружения.

Возможность или невозможность начала проникания тела в грунт, согласно элементарной теории погружения при однократном ударе [19, 20], определяется через сравнение текущего удара с эталонным. Этalonный прямой удар, являющийся наибольшим по своей силе среди холостых ударов, устанавливается через свою начальную скорость V_{-*} . Она находится из условия равновесия долота сразу после холостого удара наибольшей силы:

$$rmg - F_0 \frac{1}{k_*} = 0,$$

где

$$k_* = 1 + \frac{b_1}{\Delta} V_{-*},$$

откуда следует, что $\sigma_{d1} = \sigma_1 / k_*$; $F_0 = k_* rmg$; σ_{d1}, k_* — соответственно предельно-допустимое динамическое напряжение и коэффициент динамичности для предельного равновесного состояния долота перед погружением.

Начало погружения бурильной колонны в забое произойдет, когда $\sigma_{d1} = \sigma$ ($\sigma = \sigma_0 r$). Критическая скорость для эталонного прямого удара определяется как

$$V_{-*} = \frac{\Delta}{b_1} \left(\frac{n_1}{r} - 1 \right). \quad (4)$$

Эффективные удары, приводящие к возможности проникания долота в породу, должны иметь начальные скорости $V_- > V_{-*}$. Нужные эффективные удары долота по породе будем искать, увеличивая критическую скорость эталонного удара V_{-*} в λ раз, т. е. считая, что $V_- = \lambda V_{-*}$ (λ заранее неизвестно). Для устранения остановок погружения между ударами, значение λ подбирается так, чтобы время t , затрачиваемое на погружение долота до его остановки,

было не меньше заданного временного интервала Δt между соседними ударами ($t \geq \Delta t$). Это устанавливается при нахождении численных решений для дифференциального уравнения погружения [21]:

$$\ddot{x} = g \left[1 - n_1 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + b_1 \lambda V_{-*} e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta} \right] \quad (5)$$

с начальными условиями: $x_0 = 0; \dot{x}_0 = \lambda V_{-*} - V_{-*} = V_{-*}(\lambda - 1)$, при возможных $\lambda = 1 + \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ — задаваемое приращение при подборе нужного λ .

Определение начальной скорости погружения долота через разность начальных скоростей текущего эффективного и эталонного ударов обосновано в [19]. Численное интегрирование дифференциального уравнения при каждом выбранном λ прекращается в момент жесткой остановки долота в погружении. Остановку погружения долота в твердой среде следует ожидать жесткой, как при ударе, когда текущая скорость \dot{x} уменьшится до нуля скачком. Возникновение жесткой остановки происходит в момент, когда

$$\dot{x} = V_{-*}(1 - \lambda e^{-\vartheta x}), \quad (6)$$

где значения x, \dot{x} определяются в процессе численного интегрирования дифференциального уравнения (5) [21]. В момент окончания погружения \dot{x} будет являться начальной скоростью микроудара остановки, а момент окончания погружения t — определять продолжительность погружения при выбранном значении λ . Поиск нужного значения λ можно завершить, когда $t > \Delta t$. Найденное значение в дальнейшем обозначается как $\tilde{\lambda}$, искомый удар долота о породу будет определяться его начальной скоростью: $\tilde{V}_- = \tilde{\lambda} V_{-*}$.

Условие жесткой остановки можно использовать в качестве события для нахождения момента окончания интегрирования дифференциального уравнения погружения, если делать это в системе MatLab с помощью решателей с заданной точностью. В [21] приведены обоснования того, что движение в грунтовых средах, в отличие от воздушных сред, должно обязательно заканчиваться ударом. Микроудар остановки будет свидетельствовать о том, что тело натыкается на непреодолимое препятствие в виде той части грунта, где прочность еще не успела уменьшиться до нужного значения из-за затухания трещин от места нанесенного удара. Реальная жесткая остановка по времени будет происходить быстрее в сравнении с обычной мягкой остановкой [21] при отсутствии микроудара.

Считая удары упругими, определим, с какой начальной скоростью V_{1-} должны наноситься удары ударником о долото. Из стереомеханической теории удара следует, что

$$V_{1-} = \frac{(m + m_1)V_- - (m - \kappa m_1)\dot{x}}{m_1(1 + \kappa)}, \quad (7)$$

здесь κ — коэффициент восстановления, определяемый опытным путем ($0 < \kappa \leq 1$). В случае не закончившегося погружения от предыдущего удара, долото имеет заранее неизвестную скорость \dot{x} . Определяется максимально возможный по силе удар ударника по его начальной скорости \tilde{V}_{1-} , приводящий к нужной начальной скорости долота \tilde{V}_- . Это достигается, когда в приведенной формуле (7) $\dot{x} = 0$:

$$\tilde{V}_{1-} = \frac{\tilde{\lambda}(m + m_1)}{m_1(1 + \kappa)} V_{-*}. \quad (8)$$

Такая начальная скорость будет достаточной, чтобы погружение долота не приостанавливалось на временном интервале Δt между ударами, независимо от текущей скорости \dot{x} погружения. Приведенный алгоритм позволяет устанавливать нужные параметры для прямых ударов: $\lambda = \tilde{\lambda}$, $V_{1-} = \tilde{V}_{1-}$, где “~” — значения, определенные при конкретных расчетах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ

В отличие от ударного бурения, для второй модели БК (рис. 1б), помимо ударов, учитывается действие, создаваемое вращающимся долотом. Обычно предполагается, что в забое скважины ударами ударника создается основное силовое воздействие, которое через вращающееся долото передается на породу. Непрерывное дробящее-скалывающее действие вращающимся долотом играет вспомогательную роль, что должно соответствовать условию $V_- > R|\Omega_-|$. Наносимые удары должны быть достаточно сильными и приводить к основным разрушающим действиям с нужной потерей прочности в виде образующихся трещин. Действие же вращающегося долота направлено главным образом на скальвание и измельчение фрагментов породы для получения возможности их последующего удаления из забоя при углублении скважины. От ударов возникающие трещины распространяются в основном по направлению предполагаемого погружения БК, от действия вращающегося долота — в поперечных направлениях, когда $a < 1$. Осевая нагрузка носит вспомогательный характер, ее главное назначение заключается не в обеспечении внедрения резцов в породу, а в создании постоянного плотного контакта инструмента с забоем.

Для определения параметров безостановочного погружения при моделировании ударно-вращательного бурения нужно сначала провести предварительный расчет, при котором $\lambda = \tilde{\lambda}$, $V_{1-} = \tilde{V}_{1-}$, как это делалось при ударном способе бурения с учетом принятых обозначений. Разница будет заключаться в окончательном расчете ударно-вращательного бурения.

Оптимальные параметры полностью аналогичные тем, которые соответствуют ударному бурению. При переходе к уточненному расчету ударно-вращательного бурения задается начальная обобщенная скорость для комбинированного удара через ее составляющие: $V_- = \tilde{\lambda}V_*$ и $\Omega_- = \dot{\phi}_-$ ($\dot{\phi}_- = \dot{\phi}$ — определяется в момент очередного удара). На заданном временном интервале $T = N\Delta t$, где N — число ударов, наносимых ударником, решается система уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} \geq 0 : \quad \ddot{x} = g \left[r - n_1 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\phi}| + b_1(\tilde{\lambda}V_* + aR|\Omega_-|)e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta} \right]; \\ \dot{\phi} \neq 0 : \quad I\ddot{\phi} = -c_\varphi(\varphi - \omega t) - \rho_0 n_1 mg \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\phi}| + b_1(\tilde{\lambda}V_* + aR|\Omega_-|)e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta} \operatorname{sign}\dot{\phi}; \\ \dot{\phi} \equiv 0 : \quad \text{если } |\varphi - \omega t| < \frac{\rho_0 n_1 mg}{c_\varphi} \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + b_1(\tilde{\lambda}V_* + aR|\Omega_-|)e^{-\vartheta(x-x_0)} + \Delta}, \end{cases} \quad (9)$$

для которых необходимо определить начальные скорости $\dot{x}_0, \dot{\phi}_0$, считая, например, что $\varphi_0 = 0, x_0 = 0$. В уравнениях учтена возможность кратковременных остановок вращения долота. Находим начальные скорости $\dot{x}_0, \dot{\phi}_0$ для дифференциальных уравнений движения долота в моменты нанесения очередного удара, когда могут возникать такие случаи:

- если долото погружается с вращением ($\dot{\phi}_- = \dot{\phi} \neq 0$), то для нахождения $\dot{x}_0, \dot{\phi}_0$ следует решить систему уравнений

$$\begin{cases} m\dot{x}_0 - m\tilde{\lambda}V_{-*} = S_n; \\ I\dot{\phi}_0 - I|\Omega_-| = S_\tau; \\ S_\tau = \rho_0 S_n; \\ \dot{x}_0 + aR\dot{\phi}_0 = (\tilde{\lambda} - 1)V_{-*} + aR|\Omega_-|. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь первые два уравнения выражают теорему импульсов для составляющих комбинированного удара, третье — гипотезу Руаса, связывающую между собой нормальные S_n и касательные S_τ ударные импульсы; четвертое — определяет начальную обобщенную скорость проникания тела в грунт после нанесенного комбинированного удара, что следует из элементарной теории проникания ударника в грунт [20]. Из системы (10) находим начальные скорости:

$$\dot{x}_0 = \left(\tilde{\lambda} - \frac{I}{I + \rho_0 amR} \right) V_{-*}, \quad \dot{\phi}_0 = |\Omega_-| - \frac{\rho_0 m}{I + \rho_0 amR} V_{-*};$$

- если долото погружается поступательно, что может происходить при кратковременных остановках вращения ($\dot{\phi}_- = \dot{\phi} \equiv 0$), начальная скорость определяется как после прямого удара: $\dot{x}_0 = (\tilde{\lambda} - 1)V_{-*}$, при отсутствии вращения ($\dot{\phi}_0 = 0$).

Решая систему уравнений (9), следует иметь в виду, что после каждого удара через время Δt начальные скорости $\dot{x}_0, \dot{\phi}_0$ и начальные координаты φ_0, x_0 будут меняться и находиться из решений на предыдущем временном интервале между ударами Δt .

Для получения более точной глубины погружения БК за время T следует принять во внимание, что после последнего удара ударником о долото остановка должна быть жесткой. Однако такая поправка при большом числе ударов будет незначительной. Нужную начальную скорость удара \tilde{V}_{1-} , создаваемого бойком ударника по долоту, следует определять по формуле (8).

ПРИМЕРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты численного моделирования для ударного и ударно-вращательного способов бурения представлены на рис. 2, 3. Графики получены для введенных моделей БК при следующих исходных данных, выраженных в основных единицах системы СИ. Прочностные свойства породы задавались через $n_1 = 12, n_{1\tau} = 1.5$ и коэффициенты аппроксимации для силы лобового сопротивления; в формулах (1), (2): $b = 0.015, b_1 = 1.5, a = 0.015, \Delta = 0.25$, которые должны определяться на основании экспериментальных данных; принималось, что $\omega = 2.094, P = 570$. Параметры для БК: $m = 34.851, I = 0.028, R = 0.120, c_\varphi = 47.401$. Длина нижней утяжеленной трубы равнялась 2, общая длина БК — 162. Внешние и внутренние диаметры труб связаны между собой соотношением $D_i = 4D_e / 5$ (индексы “e” и “i” соответствуют внешнему и внутреннему диаметру D труб), $D_e = 0.089$ — для нижней утяжеленной трубы, $D_e = 0.030$ — для обычновенных труб. Плотность материала, коэффициент Пуассона, модули Юнга и сдвига для труб следующие: $\rho = 7800, \nu = 0.3, E = 2.1 \cdot 10^{11}, G = E / [2(1+\nu)] = 8.1 \cdot 10^{10}$. Кроме того, задавались: $\vartheta = 67^\circ, \kappa = 0.6, \varepsilon_\rho = 2.7, \Delta t = 0.075, N = 140, T = 10.5; \rho_0 = 0.0289$ и $\varepsilon_1 = 0.0780$ вычислялись по формулам (3).

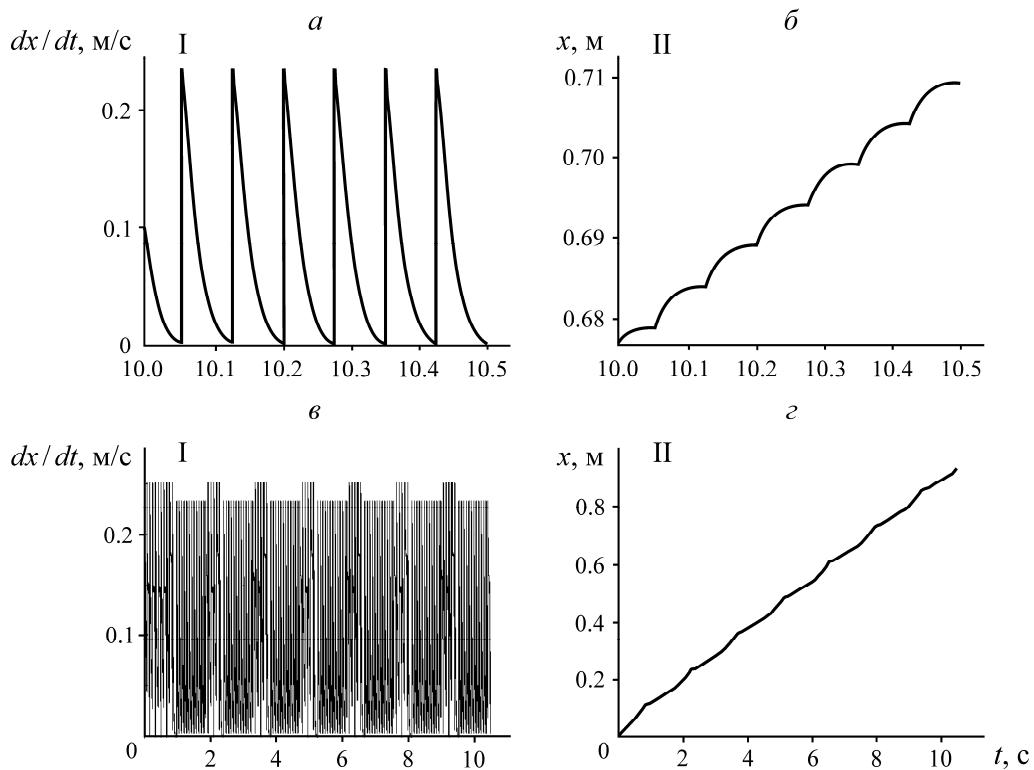


Рис. 2. Графики для ударного способа бурения в укрупненном виде (a, b) и для ударно-вращательного способа бурения (c, d): I — линейная скорость погружения долота; II — глубина погружения бурильной колонны

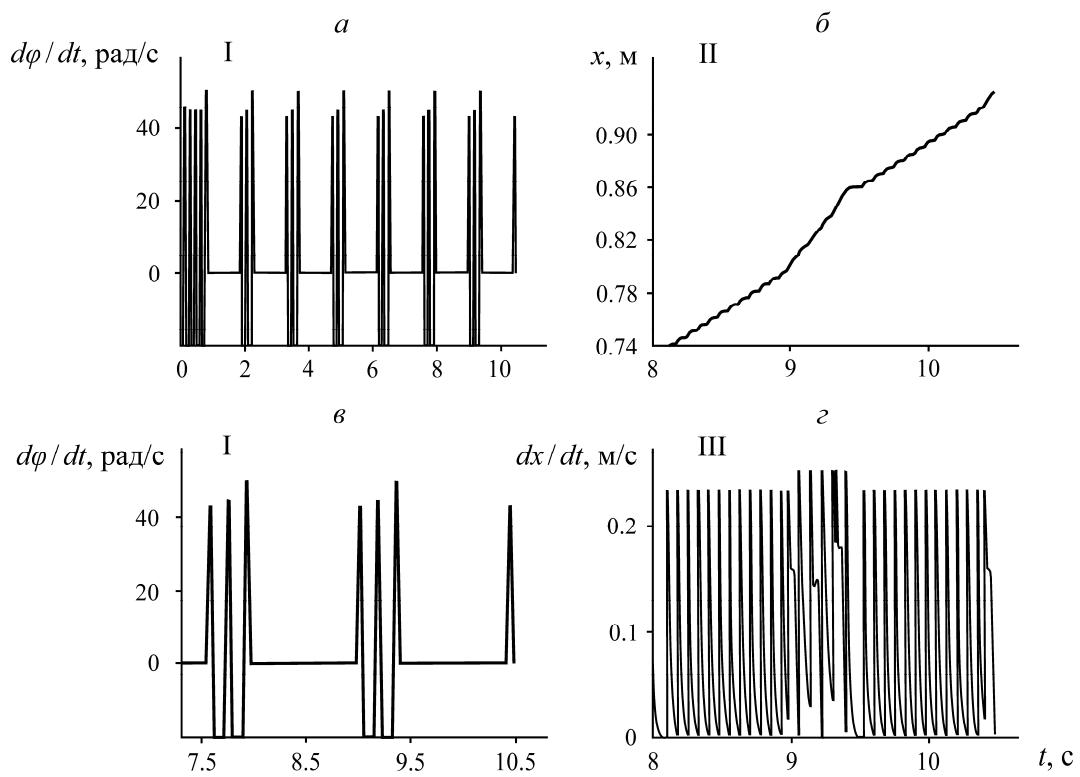


Рис. 3. Графики для ударно-вращательного способа бурения в обычном (a) и укрупненном (b, c, d) виде: I — угловая скорость долота; II — глубина погружения бурильной колонны; III — линейная скорость погружения долота

Указанные параметры выбирались, чтобы для второй модели БК наблюдалось вращательное движение долота с кратковременными остановками – заклиниваниями, что позволяет дать представление о недостатках такого бурения в сравнении с безостановочным вращением. На рис. 2, 3 наглядно показано развитие динамики процессов. При ударном бурении процесс однообразен, монотонен и периодически повторяется; при ударно-вращательном бурении, когда кратковременная остановка долота прекращается и начинается его вращение, — процесс теряет свое однообразие и в погружении убыстряется. Чтобы выйти на безостановочное погружение долота, для него находилась критическая скорость удара $V_{*} = 0.5832$, которая затем увеличена в $\tilde{\lambda} = 1.4$ раз до $\tilde{V}_{*} = \tilde{\lambda} V_{*} = 0.8164$. Для достижения этого необходимо наносить бойком удары с начальной скоростью $V_1 = 6.5759$ (масса бойка $m_1 = 3.485$). Кинетическая энергия одного такого удара соответствует 75.3518, а продолжительность погружения может длиться не менее $t = 0.0772$, что гарантирует безостановочность погружения от серии ударов, наносимых через заданные промежутки времени $\Delta t = 0.075$.

Безостановочное вращение долота — наиболее желаемый режим бурения, позволяющий ускорить процесс, но необходимых условий для этого пока не выявлено. Безостановочное вращение долота можно предусмотреть только с помощью численного моделирования бурения. Для получения достоверных результатов такого моделирования следует уделять внимание определению коэффициентов аппроксимации b, b_1, a, Δ и коэффициента затухания ϑ в формулах (1), (2).

ВЫВОДЫ

Приведенные одномассовые модели бурильной колонны при ударном и ударно-вращательном бурении можно рассматривать как начальное приближение для построения более точных расчетных схем. В рамках предложенных моделей процесс бурения описан математически строго, без использования дополнительных эмпирических соотношений и с учетом углубления забоя скважины. Для возможности безостановочного погружения долота в процессе бурения приведен полный алгоритм нахождения оптимальных начальных скоростей при ударах, создаваемых ударником с заданной частотой нанесения их по долоту. При определении оптимальных ударов показано, как следует учитывать жесткую остановку твердого тела в прочностных грунтах (породах). Такая остановка, в отличие от движения в непрочных средах, например воздушных, должна заканчиваться микроударом.

Полученные результаты могут быть использованы при эксплуатации или разработке конкретных моделей ударников для достижения оптимальных режимов бурения. Для этого необходима разработка методики экспериментального определения параметров моделей, что планируется сделать в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Euler L. Neue grundsätze der artillerie. Reprinted as Eulers opera omnia, Berlin, B. G. Teubner, 1922.
2. Сагомонян А. Я. Проникание. — М.: МГУ, 1974. — 299 с.
3. Велданов В. А., Марков В. А., Пусев В. И., Ручко А. М., Сотский М. Ю., Федоров С. В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // Журн. техн. физики. — 2011. — Т. 81. — № 7. — С. 94–104.

4. Юнин Е. К., Хегай В. К. Динамика глубокого бурения. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. — 286 с.
5. Нагаев Р. Ф., Исаков К. А., Лебедев Н. А. Динамика горных машин. — СПб.: СПГИ, 1996. — 155 с.
6. Неймарк Ю. И. Теория вибрационного погружения и вибровыдергивания // Инж. сб. АН СССР. — 1953. — Т. XVI. — С. 13–49.
7. Блехман И. И. Исследование процесса вибрационной забивки свай и шпунтов // Инж. сб. АН СССР — 1954. — Т. XIX. — С. 55–64.
8. Блехман И. И. Вибрационная техника. — М.: Физматлит, 1994. — 400 с.
9. Monteiro H. L. S. and Trindade M. A. Performance analysis of proportional-integral feedback control for the reduction of stick-slip-induced torsional vibrations in oil well drillstrings, J. Sound Vibration, 2017, Vol. 398. — P. 28–38.
10. Tang L., Guo B., Zhu X., Shi Ch., and Zhou Y. Stick-slip vibrations in oil well drillstring: A review. J. Low Frequency Noise, Vibration Active Control, 2020, Vol. 12. — P. 1–23.
11. Tucker R. W. and Wang C. On the effective control of torsional vibrations in drilling systems, J. Sound Vibration, 1999, Vol. 224, No. 1. — P. 101–122.
12. Белокобыльский С. В. Динамика систем с сухим трением и ее приложение к задачам горной механики. — М.: Машиностроение, 2002. — 209 с.
13. Малюгин А. А., Казунин Д. В. Расчет колебаний бурильной колонны в режиме реального времени в составе тренажерных систем // Вестн. СПбУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2017. — Т. 13. — Вып. 1. — С. 91–101.
14. Синеев С. В. Модели процесса бурения и их практическое использование // Вестн. Ассоциации буровых подрядчиков. — 2009. — № 3. — С. 35–44.
15. Бейкер Дж., Грейс-Моррис П. Аппроксимация Паде: пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 502 с.
16. Андронов В. В., Журавлев В. Ф. Сухое трение в задачах механики. — М.: Ижевск: R&CDynamics, 2010. — 183 с.
17. Коронатов В. А. Начала построения строгой теории бурения // Системы. Методы. Технологии. — 2016. — № 4 (32). — С. 83–94.
18. Коронатов В. А. Крутильно-продольные автоколебания бурильной колонны с долотом дробящескальвающимся действия при постоянном натяжении каната подвеса // ФТПРПИ. — 2023. — № 1. — С. 45–60.
19. Коронатов В. А. Элементарная теория проникания ударника в твердые грунтовые среды при однократном ударе, с учетом возникающих трещин // Системы. Методы. Технологии. — 2021. — № 1 (49). — С. 25–33.
20. Коронатов В. А. Обобщение элементарной теории проникания в грунтовые среды при однократном ударе на случай вращающегося ударника // Системы. Методы. Технологии. — 2022. — № 1 (53). — С. 21–29.
21. Коронатов В. А. Глубина погружения ударника в грунт при жесткой остановке и сравнение элементарной теории проникания с другими методами // Системы. Методы. Технологии. — 2023. — № 2 (58). — С. 38–45.
22. Киселев А. Т., Крусири И. Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. — М.: Недра, 1982. — 103 с.
23. Клишин В. И., Кокоуллин Д. И., Кубанычбек Б., Алексеев С. Е., Шахторин И. О. Обоснование типа и параметров погружного пневмоударника для увеличения скорости проходки скважин малого диаметра // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 65–71.
24. Липин А. А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. — 2005. — № 2. — С. 74–78.

25. Гилета В. П., Ванаг Ю. В. Выбор параметров пневмоударного горизонтального проходчика скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 2. — С. 229–233.
26. Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попельюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
27. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. — М.: Изд-во литературы по строительству, 1985. — 448 с.
28. Тарасов В. Н., Бояркина И. В., Коваленко М. В., Кузнецов С. М., Шлегель И. Ф. Теория удара в строительстве и машиностроении. — М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. — 336 с.
29. Щейтлин М. Г., Верстов В. В., Азбель Г. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буро-вых работах. — Л.: Стройиздат, 1987. — 263 с.
30. Пэнлеве П. Лекции о трении. — М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1954. — 316 с.
31. Contensou P. Couplage entre frottement de glissement et frottement de pivotement dans la theorie de la toupee, Kreiselprobleme Gyrodynamics, IUTAM Symp. Celerina, 1962, Berlin etc., Springer, 1963. — Р. 201–216.
32. Коронатов В. А. О сухом трении при непоступательном скольжении тела и критика теории Контенсу – Журавлева // Системы. Методы. Технологии. — 2019. — № 1 (41). — С. 21–28.

Поступила в редакцию 25/IX 2023

После доработки 29/XI 2023

Принята к публикации 24/I 2024