

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.24.05

**БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ БУРЕНИИ РАЗВЕДОЧНЫХ
И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН**

В.В. КУЛИКОВ, М.С. ФРОЛОВА

*Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23; e-mail: ingeneer-graph-kaf@mgri-rggru.ru*

Рассмотрены наиболее общие математические модели передачи механической энергии от буровой установки и бурового насоса в скважину. Обоснованы и предложены аддитивная, пропорциональная и обобщённая модели процесса передачи энергии. Базовая аддитивная математическая модель передачи механической энергии лежит в основе традиционной методики расчёта энергозатрат при бурении скважин и расчёта гидравлических сопротивлений в скважине. Основным свойством аддитивной модели является отсутствие взаимного влияния участков передачи энергии. Базовая пропорциональная математическая модель передачи механической энергии характеризуется следующими свойствами: значения коэффициентов полезного действия (КПД) участков передачи энергии неизменны; общий КПД всех участков остаётся неизменным; на различных участках передачи энергии расходуемая мощность меняется в различное число раз; участки передачи энергии взаимно влияют один на другой; наибольшей степенью влияния обладает последний участок, наименьшей — первый участок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: буровой насос; буровой станок; гидравлическое сопротивление; давление; колонна буровых труб; мощность; энергия; коэффициент полезного действия.

**BASE MATHEMATICAL MODELS OF PROCESS OF TRANSMISSION
OF MECHANICAL ENERGY DURING DRILLING OF EXPLORATORY
AND GEOTECHNOLOGICAL WELLS**

V.V. KULIKOV, M.S. FROLOVA

*Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23; e-mail: ingeneer-graph-kaf@mgri-rggru.ru*

The most general mathematical models of transmission of mechanical energy from the drilling rig and boring pump in a mining hole are considered in the paper. Additive, proportional and generalized models of process of transmission of energy are grounded and offered. The base additive mathematical model of transmission of mechanical energy is underlain in the basis of the traditional method of calculation of energy consumption at well-drilling and calculation of hydraulic resistances in a mining hole. Basic property of the additive model is absence of cross-coupling of different parts of transmission of energy. The base proportional mathematical model of transmission of mechanical energy is characterized by the followings properties: the values of the coefficient of efficiency of the parts of transmission of energy ratios stay unchanging; general coefficient of efficiency of all areas remains unchanging; at the different areas of transmission of energy the spent power changes in different number of times; the areas of transmission of energy mutually influence on each other; the maximum degree of influence is possessed by the last area, the least one is in the first area.

К e y w o r d s: boring pump; boring rig; hydraulic resistance; pressure; column of boring pipes; power; energy; coefficient of efficiency.

При вращательном способе бурения скважины и нагнетательной промывке жидким очистным агентом независимыми поверхностными источниками механической энергии, затрачиваемой на вращение и перемещение бурового снаряда в осевом направлении, а также на процесс циркуляции бурового раствора, выступают приводы (приводящие двигатели) буровой установки (бурового станка) и бурового насоса. От приводящих двигателей вращателя и гидросистемы (при её наличии) в окружном (вращение) и продольном (осевое перемещение) направлениях буровой станок передаёт энергию колонне бурильных труб и далее, через породоразрушающий инструмент (ПРИ), на забой скважины.

Буровой насос получает механическую энергию от двигателя и направляет её непосредственно вытеснителям жидкости (поршням, плунжерам, насосному колесу) и через них – потоку очистного агента, нагнетаемого в скважину и далее направляемого в поверхностную систему очистки бурового раствора от выбуренного ПРИ шлама.

У закономерностей передачи энергии от поверхностного оборудования (буровой станок, буровой насос) в скважину есть общие характеристики, не зависящие от целевого назначения передаваемой энергии, потребителя и вида оборудования, а также некоторые специфические свойства, зависящие от них.

Путь передачи механической энергии от поверхностного оборудования представим в виде m последовательно соединённых участков. С целью обоснования и анализа математических моделей процесса передачи механической энергии введём следующие обозначения: $N_{\text{вых}i}$, $N_{\text{вх}i}$ – соответственно мощность (поток энергии) при выходе и входе в рассматриваемый i -й участок пути передачи энергии; $N_{\text{вых}i}$, $N_{\text{вх}i}$ – соответственно изменение мощности (потока энергии) при выходе и входе в рассматриваемый i -й участок вследствие изменения условий передачи энергии в скважине при неизменных принудительно задаваемых с поверхности параметрах режима бурения (осевом усилии подачи $G_{\text{п}}$: $G_{\text{п}} = idem$; частоте вращения бурового инструмента n : $n = idem$; объёмном расходе очистного агента Q : $Q = idem$; подаче бурового снаряда за один оборот вокруг своей оси $h_{1об}$: $h_{1об} = idem$). Изменение передаваемой мощности может быть вызвано, например, сменой свойств разбуриваемых горных пород, износом ПРИ, сужением или расширением ствола скважины, самозаклиниванием керна в колонковом наборе, искривлением скважины, изменением формы вращения и изгиба, частоты, периода и амплитуды колебаний бурильных труб в скважине и другими причинами.

Величины $N_{\text{вых}i}$, $N_{\text{вх}i}$ – алгебраические, следовательно, имеющие знак: при увеличении мощнос-

ти при выходе или при входе в участок пути её передачи $N_{\text{вых}i} > 0$ и $N_{\text{вх}i} > 0$, при уменьшении величины мощности $N_{\text{вых}i} < 0$ и $N_{\text{вх}i} < 0$.

Как показано в [2, 4, 6, 7], в основу анализа базовых математических моделей передачи энергии рационально положить следующее отношение мощностей при выходе из i -го участка и при входе в i -й участок пути передачи энергии, называемое коэффициентом полезного действия (КПД) этого участка η_i :

$$\eta_i = N_{\text{вых}i} / N_{\text{вх}i} \quad (1)$$

При изменении выходной и входной мощностей на величины $N_{\text{вых}i}$ и $N_{\text{вх}i}$ соответственно значение КПД изменится ($\eta_i = idem$) и формула (1) примет следующий вид:

$$\eta_i = (N_{\text{вых}i} + \Delta N_{\text{вых}i}) / (N_{\text{вх}i} + \Delta N_{\text{вх}i}) \quad (2)$$

Как показали результаты проведённых и представленных ниже аналитических исследований, рационально выделить две базовые модели передачи энергии при бурении скважин различного целевого назначения.

Аддитивная математическая модель передачи энергии

Пусть

$$N_{\text{вых}i} = N_{\text{вх}i} = N_i \quad (3)$$

Тогда (2) примет вид:

$$\eta_i = (N_{\text{вых}i} + \Delta N_i) / (N_{\text{вх}i} + \Delta N_i) \quad (4)$$

Полученное выражение (4) показывает, что при изменении мощности при выходе из участка на величину ΔN_i мощность при входе в данный участок изменится на ΔN_i , значение КПД также изменится ($\eta_i = idem$). Продолжая аналогичные рассуждения для m участков, придём к выводу: при изменении мощности в скважине на величину ΔN_i поверхностное буровое оборудование изменит передаваемую в единицу времени энергию на ту же величину ΔN_i . Следовательно, при выполнении условия (3) все изменения энергии в скважине суммируются [1, 3, 4, 7]:

$$N = N_{\text{вх}1} - N_{\text{вых}1} + N_1 + N_{\text{вых}1} - N_{\text{вх}2} + N_2 + N_{\text{вх}2} - N_{\text{вых}2} + N_3 + \dots \quad (5)$$

где N – общие (суммарные) затраты энергии.

Но $N_{\text{вх}1} = N_{\text{вх}2}$, $N_{\text{вых}2} = N_{\text{вх}3}$ и т. д.

Тогда

$$N = N_{\text{вх}1} - N_{\text{вых}1} + N_1 + N_{\text{вх}2} - N_{\text{вых}2} + N_2 + N_{\text{вх}3} - N_{\text{вых}3} + N_3 + \dots \quad (6)$$

Введём обозначения для потери мощности на каждом участке: $N_1 = N_{\text{вх}1} - N_{\text{вых}1}$, $N_2 = N_{\text{вх}2} - N_{\text{вых}2}$, $N_3 = N_{\text{вх}3} - N_{\text{вых}3}$ и т.д.

Следовательно,

$$N = \sum_{i=1}^m (N_i + N_i). \quad (7)$$

Общие затраты энергии N , в соответствии с (7), находятся путём сложения энергозатрат на всех участках от $i = 1$ до $i = m$. Рассмотренную базовую модель передачи энергии в формулах (4) и (7) в силу основного её свойства (суммирование изменений энергии и энергозатрат на всех участках) назовём «аддитивной».

Уравнение (7) находит широкое применение при расчёте затрат мощности на процесс углубки скважины (суммарные энергозатраты на вращение колонны бурильных труб, на разрушение забоя скважины и т. д. [1]). Однако следует отметить, что экспериментально подтверждённых результатов проверки корректности модели (7) применительно к расчёту мощности буровой установки в литературе нет: аддитивная математическая модель (7) принимается в [1] без объяснений и доказательств как единственно возможная. Хотя существенные расхождения результатов измеряемых и рассчитываемых энергозатрат, отмечаемые многими исследователями, свидетельствуют о необходимости принципиального подтверждения применимости аддитивной модели (7) к расчёту затрат мощности на процесс бурения скважины.

При работе бурового насоса, имеющего «жёсткую» подачу (поршневой или плунжерный насос)

$$N = P \cdot Q, \quad (8)$$

где N — гидравлическая мощность насоса; P — развиваемое насосом давление; Q — объёмная производительность бурового насоса, $Q = idem$.

Применительно к работе бурового насоса во всех рассмотренных выше формулах величины мощностей удобнее разделить на неизменное значение Q . Поскольку развиваемое насосом давление расходуется на преодоление сил внутреннего трения в жидкости на всех участках, то (4) и (7) примут соответственно вид

$$(P_{\text{вых}i} + P_{\text{тр}i}) / (P_{\text{вх}i} + P_{\text{тр}i}), \quad (9)$$

где $P_{\text{вых}i}$, $P_{\text{вх}i}$ — абсолютное давление при выходе из i -го участка и при входе в i -й участок движения соответственно; $P_{\text{тр}i}$ — изменение гидравлического сопротивления i -го участка движения очистного агента, например, вследствие его сужения, расширения, изменения шероховатости его поверхности и т. д.

$$P = \sum_{i=1}^m (P_{\text{тр}i} + P_{\text{тр}i}), \quad (10)$$

где $P_{\text{тр}i}$ — потеря давления на преодоления сил внутреннего трения (линейных и местных) на i -м участке движения очистного агента [5].

Аддитивная модель в формуле (10) является базовой при расчёте давления, развиваемого насосом [5]. С достаточной для инженерных расчётов точностью модель (10) соответствует данным экспериментальных измерений.

Основным свойством представленной аддитивной модели (в формулах (4), (7), (9), (10)) является отсутствие взаимного влияния участков передачи энергии: энергетические затраты на каждом из участков носят независимый от других участков характер.

Пропорциональная математическая модель передачи энергии

Примем, что величины изменений энергии $N_{\text{вых}i}$ и $N_{\text{вх}i}$, входящие в (2), подчиняются следующим тождествам соответственно:

$$N_{\text{вых}i} = N_{\text{вых}i} \cdot (b_i - 1), \quad (11)$$

$$N_{\text{вх}i} = N_{\text{вх}i} \cdot (a_i - 1), \quad (12)$$

где b_i , a_i — некоторые положительные числовые коэффициенты.

После подстановки (11) и (12) в (2), имеем:

$$i = N_{\text{вых}i} \cdot b_i / (N_{\text{вх}i} \cdot a_i). \quad (13)$$

Согласно (13), выходная и входная мощности меняются в b_i и a_i раз соответственно. При этом величина КПД в (13), в сравнении с (1), в общем случае (при b_i , a_i) изменится ($i = idem$).

Пусть мощность при выходе из участка $N_{\text{вых}i}$ и при входе в участок $N_{\text{вх}i}$ меняются в одинаковое число раз: $b_i = a_i$, но тождества (11) и (12) не выполняются и, следовательно, аддитивная модель (4) не справедлива.

Тогда имеем для любого i -го участка:

$$i = N_{\text{вых}i} \cdot b_i / (N_{\text{вх}i} \cdot a_i) = N_{\text{вых}i} \cdot a_i / (N_{\text{вх}i} \cdot a_i), \quad (14)$$

$$i = N_{\text{вых}i} / N_{\text{вх}i} = idem. \quad (15)$$

Полученная математическая модель процесса передачи механической энергии (15) показывает, что при изменении выходной и входной мощностей в одинаковое число раз значение КПД участка остаётся неизменным. Основным свойством данной модели является пропорциональное изменение мощностей. В соответствии с этим основным свойством математическую модель процесса передачи энергии (15) назовём «пропорциональной моделью».

Основному свойству модели (15) может подчиняться не только отдельно взятый участок, но и все участки в целом [3; 4]:

$$= N_{\text{вых}m} \cdot a / (N_{\text{вх}1} \cdot a) = N_{\text{вых}m} / N_{\text{вх}1} = \text{idem}, (16)$$

где — общий (полный) КПД всех участков передачи механической энергии; $N_{\text{вых}m}$ — мощность при выходе из последнего ($i = m$) участка; $N_{\text{вх}1}$ — мощность при входе в первый ($i = 1$) участок передачи энергии.

$$= \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_m = \prod_{i=1}^m \eta_i = \text{idem}, (17)$$

где m — число последовательно соединённых участков пути передачи энергии; i — порядковый номер участка, $i = 1, 2, 3, \dots, m$, нумерация участков производится в направлении передачи энергии — от источника к потребителю; η_i — КПД i -го участка; $\prod_{i=1}^m \eta_i$ — последовательное произведение i -х значений КПД участков от $i = 1$ до $i = m$.

Рассмотрим одно из важнейших свойств пропорциональной математической модели передачи энергии.

Пусть мощность $N_{\text{вх}1}$ на первом ($i = 1$) из участков изменилась в a раз или, что то же самое, на величину N :

$$N_{\text{вх}1} \cdot a = N_{\text{вх}1} + N, (18)$$

откуда

$$a = 1 + N / N_{\text{вх}1}. (19)$$

Следовательно,

$$N_{\text{вх}1} \cdot a = N_{\text{вх}1} \cdot (1 + N / N_{\text{вх}1}). (20)$$

При этом, в соответствии с (16), энергия в единицу времени на последнем участке $N_{\text{вых}m}$ также изменится в a раз и станет равной $N_{\text{вых}m} \cdot a$.

Тогда

$$N^* = N_{\text{вх}1} \cdot a - N_{\text{вх}1} = N_{\text{вх}1} \cdot (a - 1) = N, (21)$$

где N^* — приращение потока энергии на первом участке ($i = 1$) при его изменении на величину N .

Если в a раз или, что то же самое, на величину N , изменилась мощность $N_{\text{вых}m}$ на последнем ($i = m$) из участков, то

$$N_{\text{вых}m} \cdot a = N_{\text{вых}m} + N. (22)$$

Тогда, согласно (19) и (20),

$$a = 1 + N / N_{\text{вых}m}. (23)$$

$$N_{\text{вых}m} \cdot a = N_{\text{вых}m} \cdot (1 + N / N_{\text{вых}m}). (24)$$

В силу пропорциональной модели (16), поток энергии при входе на первый участок $N_{\text{вх}1}$ также изменится в a раз и станет равным $N_{\text{вх}1} \cdot a$.

Следовательно,

$$N^{**} = N_{\text{вх}1} \cdot a - N_{\text{вх}1} = N_{\text{вх}1} \cdot (a - 1) = N \cdot N_{\text{вх}1} / N_{\text{вых}m} = N / \eta, (25)$$

где N^{**} — приращение потока энергии на первом участке ($i = 1$) при изменении потока энергии на последнем ($i = m$) участке на величину N .

При малых значениях величины КПД, характерных для процесса бурения скважин, $N^{**} \gg N^*$, так как $N / \eta \gg N$. Таким образом, в базовой пропорциональной математической модели передачи механической энергии, в отличие от аддитивной модели, существенную роль играет конкретное место расположения того участка, на котором происходит изменение потока энергии. При изменении потока энергии на последнем ($i = m$) участке на величину N мощность на первом участке изменится на величину N / η . Степень влияния на общий расход энергии изменения энергозатрат на последнем участке наивысшая, а на первом — наименьшая. Представленное подробное рассмотрение свойства пропорциональной математической модели передачи механической энергии (зависимости величины полной энергии от места участка затрат мощности в цепи её передачи) вызвано следующими обстоятельствами. Указанное свойство играет важную роль в процессах энергообмена, однако не стало традиционным инструментом анализа энергетических процессов: оно отсутствует в учебной и, за единичными исключениями, научной литературе, как следствие, практически даже не известно большинству специалистов!

Следствием пропорциональной математической модели (15) являются следующие её значимые специфические свойства [3; 4]:

значения КПД участков неизменны, меняться могут значения мощностей;

общий (полный) КПД всех участков передачи механической энергии остаётся неизменным при изменении мощностей на отдельных участках;

при изменении мощностей на каком-либо участке в a_i раз на предшествующих и последующих (по пути передачи энергии) участках мощности также изменятся, но в другое, отличное от a_i число раз;

участки передачи энергии взаимно влияют один на другой: изменение затрат энергии на любом из участков вызовет изменение энергозатрат как на предшествующем и последующем, так и на всех остальных участках передачи энергии;

степень влияния КПД разных участков на общие энергозатраты различная: наибольшей степенью влияния обладает последний (по пути передачи энергии) участок, наименьшей — первый участок.

Поясним указанные выше свойства пропорциональной модели следующим условным (но воз-

возможным в действительности для некоторой реальной глубокой скважины) примером передачи энергии от буровой установки на забой скважины [2– 4]. Пусть при некоторых стационарных условиях бурения, в соответствии с (16), $\eta = N_{\text{выхл}}/N_{\text{вхл}} = 0,02$ [7], $N_{\text{выхл}} = 10^4$ Вт. Тогда $N_{\text{вхл}} = N_{\text{выхл}} / \eta = 10^4/0,02 = 500 \cdot 10^3$ Вт. Пример показывает, что для энергозатрат (в единицу времени) на разрушение горных пород забоя скважины буровым долотом (т. е. для мощности $N_{\text{выхл}}$ величиной в 10^4 Вт, переданной на забой) необходимо на поверхности затратить $50 \cdot 10^4$ Вт (в 50 раз больше). Если расход мощности на разрушение забоя скважины увеличится, например, в $a = 1,5$ раз и станет равным $N_{\text{выхл}} \cdot a = 1,5 \cdot 10^4$ Вт (возрастёт на $5 \cdot 10^3$ Вт), то (при условии $\eta = idem$, $n = idem$, $Q = idem$ и $G_{\text{п}} = idem$) полная затрачиваемая на процесс углубки скважины мощность увеличится до значения $N_{\text{вхл}} = N_{\text{выхл}} / \eta = 1,5 \cdot 10^4 / 0,02 = 75 \cdot 10^4$ Вт (возрастёт на $250 \cdot 10^3$ Вт) или, что то же самое, в a раз: $a = 75 \cdot 10^4 / (50 \cdot 10^4) = 1,5$. Справедливо и обратное утверждение: экономия энергии, затрачиваемой в единицу времени на разрушение горных пород забоя скважины (например, на величину $5 \cdot 10^3$ Вт, т. е. в $a = 2$ раза меньшую, чем 10^4 Вт), но при условии сохранения высоких показателей углубки скважины и при $\eta = idem$, $n = idem$, $Q = idem$ и $G_{\text{п}} = idem$, приведёт на поверхности к экономии $25 \cdot 10^4$ Вт ($N_{\text{вхл}} = N_{\text{выхл}} / \eta = 5 \cdot 10^3 / 0,02 = 25 \cdot 10^4$ Вт), следовательно, затраты энергии уменьшатся в те же $a = 2$ раза.

Таким образом, экономия энергии на последних участках (на разрушение забоя скважины, на работу ПРИ и на вращение забойных компоновок буровых снарядов) существенно выгоднее экономии энергии на первых участках (на работу поверхностного бурового оборудования).

Рассмотренная пропорциональная математическая модель процесса передачи энергии, предложенная в [3, 4], позволяет объяснить возможность регистрации энергетически относительно слабых нестационарных забойных явлений (износ подшипниковых узлов бурового долота, износ резцов бурового долота, зашламование забоя скважины, подклинивание и отрыв керна и др.) по показаниям общих затрат мощности на поверхности. Физически эта возможность объясняется влиянием последовательно соединённых участков на величину передаваемой энергии. Взаимное влияние участков передачи энергии выражается, например, в том, что изменение характеристик движения одного какого-либо участка (его формы вращения и изгиба, частоты, периода и амплитуды колебаний, скорости продольного перемещения при изменении скорости углубки, глубины и поперечных размеров скважины, при затуплении резцов ПРИ и др.) может вызывать изменение характеристик

движения и, как следствие, энергозатрат на соседних участках. По этой причине становится понятной важность учёта возможных изменений энергии при расчёте общих энергозатрат. Учёт при выборе буровой установки исключительно стационарных условий процесса углубки может привести к существенной ошибке при заверке рассчитываемой полной мощности фактическим поверхностным измерением [3].

Следует отметить, что справедливость рассмотренной пропорциональной математической модели процесса передачи механической энергии на забой скважины, несмотря на её большую, чем у аддитивной модели, теоретическую обоснованность, требует экспериментального подтверждения. Кроме того, процесс взаимного влияния участков передачи энергии вызывает необходимость точного формализованного физического объяснения этого явления.

Рассмотренные выше аддитивная и пропорциональная математические модели представляют собой предельные случаи, характеризующие либо полное отсутствие взаимного влияния участков, либо обязательное наличие этого влияния. В этом смысле обе модели являются идеализированными. Можно предположить, что практически более точно отражать процесс передачи механической энергии будет обобщённая модель, предельными случаями которой являются аддитивная и пропорциональная модели:

$$\eta_i = N_{\text{выхл}i} \cdot b_i / (N_{\text{вхл}i} \cdot a_i). \quad (26)$$

В соответствии с (3), (11) и (12) (при $b_i = N_{\text{выхл}i} / (N_{\text{выхл}i} + 1)$, $a_i = N_{\text{вхл}i} / (N_{\text{вхл}i} + 1)$ и $N_{\text{выхл}i} = N_{\text{вхл}i} = N^i$) обобщённая математическая модель передачи механической энергии на i -ом участке (26) переходит в частный случай – аддитивную модель (4). Если $b_i = N_{\text{выхл}i} / (N_{\text{выхл}i} + 1)$, $a_i = N_{\text{вхл}i} / (N_{\text{вхл}i} + 1)$, $b_i = a_i$ и величина КПД i -го участка остаётся неизменной ($\eta_i = idem$), то частным случаем обобщённой модели (26) становится пропорциональная математическая модель (15).

Выводы

1. Базовая аддитивная математическая модель передачи механической энергии лежит в основе традиционной методики расчёта энергозатрат при бурении скважин и расчёта гидравлических сопротивлений в скважине.

2. Основным свойством аддитивной модели является отсутствие взаимного влияния участков передачи энергии: энергетические затраты на каждом из участков носят независимый от других участков характер.

3. Базовая пропорциональная математическая модель передачи механической энергии характеризуется следующими свойствами: значения КПД участков передачи энергии неизменны, меняться могут значения мощностей; общий (полный) КПД всех участков передачи механической энергии остаётся неизменным при изменении мощностей на отдельных участках; на различных участках передачи энергии расходуемая мощность меняется в различное число раз; участки передачи энергии взаимно влияют друг на друга: изменение затрат энергии на любом из участков вызовет изменение энергозатрат на всех остальных участках передачи энергии; степень влияния участков на

общие энергозатраты различная: наибольшей степенью влияния обладает последний (по пути передачи энергии) участок, наименьшей — первый участок.

4. Обобщённая математическая модель передачи механической энергии имеет частными случаями аддитивную и пропорциональную модели.

5. Аддитивная, пропорциональная и обобщённая математические модели процесса передачи энергии от буровой установки к ПРИ и далее на забой скважины требуют дальнейшего теоретического изучения, уточнения областей применения, целевой экспериментальной проверки и формализованного физического объяснения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоёмкость бурения геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1984. 200 с.
2. Куликов В.В. Механический коэффициент полезного действия работы бурильного инструмента в скважине // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Доклады. В 3-х томах. М.: МГРИ-РГГРУ; Ваш полиграфический партнер, 2013. Том 2. С. 244–245 с.
3. Куликов В.В. Мощность буровой установки, затрачиваемая на процесс роторного бурения нефтяной скважины // Инженер-нефтяник. 2013. № 4. С. 12–15.
4. Куликов В.В. Определение мощности, затрачиваемой на процесс бурения геолого-разведочной скважины // Изв. вузов. Геология и разведка. 2014. № 1. С. 54–59.
5. Куликов В.В. Сравнительный анализ работы центробежного и объёмного насосов // Изв. вузов. Геология и разведка. 2015. № 4. С. 86–88.
6. Куликов В.В., Тунгусов А.А., Тунгусов С.А. Коэффициент полезного действия работы колонны бурильных труб // VII Международная научно-практическая конференция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых». Материалы конференции. М.: МГРИ-РГГРУ; Экстра-Принт, 2012. С. 7–8.
7. Куликов В.В., Тунгусов А.А., Тунгусов С.А. Оценка энергопроводных свойств колонн бурильных труб по величине коэффициента полезного действия // Разведка и охрана недр. 2012. № 12. С. 39–42.