

УДК 622.233.016.25

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИН ДЛЯ БУРЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СКВАЖИН МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

А.В. Шадрина, А.Л. Саруев, Л.А. Саруев, А.А. Казанцев

Томский политехнический университет
E-mail: avshadrina@rambler.ru; ak_uti@rambler.ru

Предложена технико-экономическая модель бурильных установок, которая позволяет оптимизировать их параметры. Установлена взаимосвязь между отдельными операциями, выполняемыми приводами, и степень влияния их на производительность бурильной установки в зависимости от типа привода уже на стадии проектирования.

Процесс бурения подземных скважин малых диаметров машинами вращательно-ударного действия следует рассматривать как систему, которая предполагает наличие трех элементов: забоя, технологии бурения и бурильной установки. Ведущим и активным элементом в этой системе является бурильная установка, параметрами которой, главным образом, определяется эффективность бурения.

Эти параметры (конструктивные, технологические, экономические) образуют совокупность входных и выходных переменных этого элемента системы. Количество их значительно, а степень влияния на эффективность — различна, в связи с чем возникает задача их оптимизации [1]. Поэтому разработка метода, с помощью которого на стадии проектирования устанавливаются условия и факторы, определяющие уровень экономичности машины, формируются их влияние и взаимосвязь, имеет актуальное значение [2].

Цель методики: помочь конструктору на ранних стадиях проектирования провести комплексный технико-экономический анализ конструкции установки и на его основании определить параметры, обеспечивающие ее эффективность.

Задача, решаемая методикой: определить конечные значения параметров бурильной установки, которые обеспечили бы максимально возможную производительность бурения при снижении целого ряда таких основных и дополнительных показателей экономической эффективности, как себестоимость единицы продукции (1 пог. м скважины или 1 т добытой руды), капитальные затраты, отнесенные на единицу продукции, удельная материалоемкость и мощность.

Содержанием методики является решение следующих задач:

- анализ структуры цикла бурения;
- математическое моделирование цикла бурения;
- выбор критерия эффективности и его связи с моделируемыми параметрами;
- разработка технико-экономической модели процесса бурения;
- разработка оптимизации параметров бурильной машины;
- анализ технико-экономических показателей.

Метод определения оптимальных параметров

Сменная производительность бурильной машины определяется такими главными факторами, как механическая скорость бурения, подготовительно-заключительные операции, коэффициент загрузки машины.

Для инженерных расчетов с достаточной точностью можно рекомендовать упрощенный метод определения средней величины механической скорости бурения V_6 [2]:

$$V_6 = \frac{H}{T_6}, \quad (1)$$

где H — глубина бурения скважины, м; T_6 — время «чистого» бурения, мин.

Потери времени на подготовительно-заключительные операции учитываются коэффициентом непрерывности бурения K_6 :

$$K_6 = \frac{T_6}{T_6 + T_{в.о.}}, \quad (2)$$

где $T_{в.о.}$ — подготовительно-заключительные и вспомогательные операции, отнесенные на глубину скважины.

Коэффициент загрузки машины K_3 зависит от обеспеченности ее фронтом работ и других организационных факторов. На стадии проектирования $K_3=1$.

Тогда формула сменной производительности машины $Q_{см.}$, представленная в общем виде как:

$$Q_{см.} = V_6 \cdot T_{см.} \cdot K_6,$$

с учетом уравнений (1) и (2) будет иметь вид:

$$Q_{см.} = \frac{T_{см.} \cdot H}{T_6 + T_{в.о.}} = \frac{T_{см.} \cdot H}{T_{ц.}}, \quad (3)$$

где $T_{см.}$ — продолжительность рабочей смены, мин; $T_{ц.}$ — длительность цикла бурения скважины, мин.

Операции, составляющие $T_{ц.}$, можно разделить на операции, величина которых не зависит от параметров установки и приводов ее механизмов — T_1 , и операции, зависящие от них — $T_{з.п.}$, $T_{в.о.} = T_1 + T_{з.п.}$.

Состав выделенных групп операций:

$$T_1 = \sum_{i=1}^9 t_i,$$

где t_1, \dots, t_9 – время операций следующего содержания: получение и доставка инструмента, уборка рабочего места, ожидание подхода промывочной жидкости к забою скважины, подключение машины к водонапорной сети, замена коронки, осмотр и смазка машины, подключение к воздушной сети, проудвка (промывка) скважины.

$$T_{з.п.} = T_{б.} + t_{з.м.} + t_{с.н.} + t_{л.} + t_{х.х.} + t_{п.р.} + t_{пер.},$$

где $t_{з.м.}$ – закрепление машины в забое; $t_{с.н.}$ – свинчивание и навинчивание штанг при разборке и сборке става; $t_{л.}$ – закрепление става штанг в люнете направляющей рамы установки; $t_{х.х.}$ – холостой ход вращательно-ударного механизма при сборке и разборке става штанг; $t_{п.р.}$ – время на поворот направляющей рамы машины на следующую скважину; $t_{пер.}$ – переезд буровой установки на новый верер скважин.

Тогда уравнение производительности (3) будет иметь вид:

$$Q_{см.} = \frac{T_{см.} \cdot H}{T_1 + T_{б.} + t_{з.м.} + t_{с.н.} + t_{л.} + t_{х.х.} + t_{п.р.} + t_{пер.}}, \text{ м/смену.} \quad (4)$$

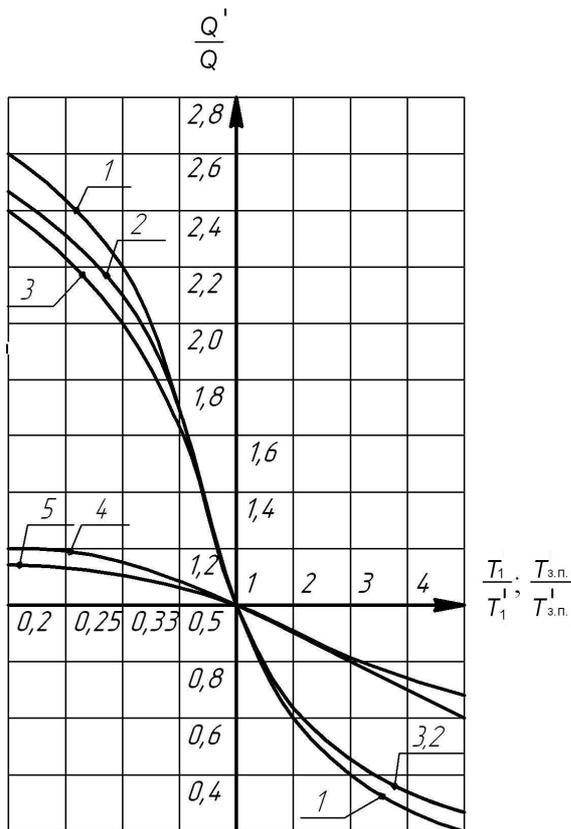


Рисунок. Влияние времени вспомогательных операций на производительность бурения: 1) $T_{з.п.}$ гидропривода; 2) $T_{з.п.}$ пневмопривода; 3) $T_{з.п.}$ пневмогидро- и электропривода; 4) T_1 гидропривода; 5) T_1 пневмопривода

На рисунке представлен график относительного изменения производительности Q'/Q , где Q' – новое значение производительности при уменьшении величин T_1 или $T_{з.п.}$ до T_1' или $T_{з.п.}'$. Анализ зависимости

(4) и рисунка показывает, что наиболее существенное влияние на нее оказывают операции, продолжительность которых зависит от параметров буровой установки. Поэтому уменьшать продолжительность данных операций за счет совершенствования параметров рационально до тех пор, пока $T_{з.п.} > T_1$. При $T_{з.п.} < T_1$ на производительность более существенное влияние оказывает группа операций T_1 .

Следовательно, величина $\Delta T = T_{з.п.} - T_1$ есть область рационального уменьшения группы операций $T_{з.п.}$. Это условие необходимо учитывать при выполнении процедуры оптимизации параметров буровой установки. Продолжительность операций группы $T_{з.п.}$ определяется целым рядом конструктивных и режимных параметров машины, инструмента и приводов. Представить эту связь можно с помощью математической модели цикла бурения.

Анализ данных зависимостей показывает, что время выполнения операций можно уменьшить за счет изменения многих параметров. Причем имеет место косвенная взаимосвязь операций, то есть уменьшение одной за счет какого-либо параметра может вызвать рост продолжительности другой. Поэтому возникает необходимость правильного выбора тех параметров, изменение которых привело бы к максимальному уменьшению $T_{в.о.}$, а значит, и к росту производительности.

Этой цели служит средняя продолжительность операции, которая является критерием рационального пути увеличения производительности:

$$t_{оп.} = \frac{T_{з.п.}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (5)$$

где t_i – продолжительность выполнения i -ой операции при бурении скважины, мин; n – количество операций, составляющих величину $T_{з.п.}$.

Связь критерия с производительностью видна, если в выражении (4) сумму операций $t_{з.м.} + \dots + t_{пер.}$ заменить величиной $t_{оп.} \cdot n$, взятой из (5), то есть

$$Q_{см.} = \frac{T_{см.} \cdot H}{T_1 + t_{оп.} \cdot n}. \quad (6)$$

Производительность бурения (6) будет расти при $t_{оп.} \rightarrow \min$. Анализ формулы (5) показывает, что достигнуть этого можно несколькими способами:

1. Уменьшить суммарную продолжительность операций путем сокращения величин ее составляющих: $T_{з.п.} \rightarrow \min$ при $n = \text{const}$.
2. Сократить количество наиболее продолжительных операций $n \rightarrow 1$, не изменяя величины остальных (теоретически, пределом сокращения служит одна операция – бурение).
3. Уменьшить продолжительность отдельных операций и их количество: $T_{з.п.} \rightarrow \min$ и $n \rightarrow 1$.

Уменьшение времени операций любым из указанных способов достигается за счет изменения параметров. Этот процесс выглядит следующим образом: при изменении каждого параметра на задан-

ный интервал Δi (не следует изменять параметры сразу до своего предельного значения) изменяются продолжительности операций и получаются новые значения $t_{оп.i}$ (5). Из всех параметров рационально изменять тот, который дает максимальное сокращение $t_{оп.}$, то есть $\Delta t_{оп.} = t_{оп.} - t_{оп.i} \rightarrow \max$. Данная процедура представлена ниже в алгоритме оптимизации.

Рост производительности за счет совершенствования параметров бурильной установки должен сопровождаться повышением уровня экономической эффективности бурения. Для того, чтобы установить условия и факторы, определяющие этот уровень, сформулировать их взаимосвязь и влияние необходима технико-экономическая модель процесса бурения.

Схема модели представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} Z_{пр.} &= Z_{пр.}(C, K_y.); \\ C &= C(K_y., Q); \\ K_y. &= K_y.(N, G, P); \\ Q &= Q(H, t_{б.}, T_{с.о.}, T_1), \end{aligned} \quad (7)$$

где $Z_{пр.}$ – удельные приведенные затраты (затраты, отнесенные на пог. м); C – себестоимость 1 пог. м скважины; $K_y.$ – удельные капитальные затраты; G – вес; N – мощность приводов установки; P – давление сжатого воздуха в сети.

Себестоимость 1 пог. м скважины складывается из заработной платы бурильщика $C_з.$, амортизационных отчислений $C_а.$, затрат на текущий ремонт $C_{т.р.}$, стоимость энергии, расходуемой на бурение $C_{э.б.}$ и на вспомогательные операции $C_{э.всп.}$, стоимости материалов $C_m.$ и прочих расходов $C_n.$ Тогда

$$C = C_з. + C_а. + C_{т.р.} + C_m. + C_{э.б.} + C_{э.всп.} + C_n.$$

Кроме того, данная модель предполагает наличие дополнительных показателей эффективности, которые, в зависимости от поставленной задачи, могут выступать ограничениями. Это – относительный вес бурильной машины и удельная мощность приводов машины. Определяются они как отношение веса машины и общей мощности приводов к единице производительности бурения (например, сменной производительности).

Процесс оптимизации параметров заключается в том, что каждый из них изменяется на заданный интервал Δi и среди вновь полученных значений параметров выбирается тот, который обеспечил максимальное снижение продолжительности средней операции $\Delta t_{оп.}$, но при этом должны соблюдаться условия:

$$Z_{пр.\Delta i} \leq Z_{пр.0}; \quad C_{\Delta i} \leq C_0; \quad G_{y.\Delta i} \leq G_{y.0}; \quad N_{y.\Delta i} \leq N_{y.0},$$

где $Z_{пр.\Delta i}$, $C_{\Delta i}$, $G_{y.\Delta i}$, $N_{y.\Delta i}$ – указанные выше величины, полученные при новом значении параметра, $Z_{пр.0}$, C_0 , $G_{y.0}$, $N_{y.0}$ – эти же величины, но полученные при исходных значениях параметров.

Если данные условия не соблюдаются, хотя бы по одному из неравенств, то выбирается другой параметр, изменение которого на свой интервал Δ_j обеспечило снижение $t_{оп.j}$ на величину близкую к

максимальной. Этот новый параметр вновь проверяется по изложенным выше ограничениям.

Задача (5–7) в общем виде может быть записана как задача статической оптимизации. Анализ этой задачи по оптимизируемым переменным показывает, что она является нелинейной многоэкстремальной функцией, на которую накладываются нелинейные ограничения. Поэтому для ее решения выбран метод покоординатного спуска (метод Гаусса-Зейделя).

Ниже приведен алгоритм оптимизации, который представляет собой следующие этапы решения:

1. Группировку вспомогательных технологических операций и определение их длительности через параметры бурильной установки и ее приводов.
2. Выбор параметров, изменение которых максимально снижает среднюю продолжительность операций.
3. Многошаговый поиск решения с учетом принятых ограничений и показателей эффективности.
 - 3.1. Весь цикл бурения скважины представить в виде двух групп операций:

$$T_1 = \sum_{i=1}^9 t_i,$$

$$T_{з.п.} = T_{б.} + t_{з.м.} + t_{с.н.} + t_{л.} + t_{х.х.} + t_{п.р.} + t_{пер.}.$$

- 3.2. Найти разность $\Delta T = T_{з.п.} - T_1$.

- 3.3. Определить математическую зависимость операций, входящих в $T_{з.п.}$, от параметров установки и ее приводов:

$$t_{з.м.} = f(a_i, b_i, \dots, K_i),$$

$$t_{б.} = f(a_i, b_i, \dots, K_j),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$t_{пер.} = f(a_m, b_m, \dots, K_m),$$

где a, b, \dots, K – параметры установки.

- 3.4. Установить предельные значения параметров:

$$a_{i \max} \geq a_i \geq a_{i \min},$$

$$b_{i \max} \geq b_i \geq b_{i \min},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$K_{i \max} \geq K_i \geq K_{i \min}.$$

- 3.5. Выбрать интервалы изменения параметров: $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta K$. Тогда исследуемые параметры могут принимать следующие величины:

$$a_1 = a_0 + \Delta a, \quad a_2 = a_1 + \Delta a, \quad \dots, \quad a_m = a_{m-1} + \Delta a;$$

$$b_1 = b_0 + \Delta b, \quad b_2 = b_1 + \Delta b, \quad \dots, \quad b_m = b_{m-1} + \Delta b;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$K_1 = K_0 + \Delta K, \quad K_2 = K_1 + \Delta K, \quad \dots, \quad K_m = K_{m-1} + \Delta K.$$

- 3.6. Определить среднюю продолжительность операции при начальных значениях параметров:

$$t_{оп.} = \frac{T_{б.} + t_{з.м.} + t_{с.н.} + t_{л.} + t_{х.х.} + t_{п.р.} + t_{пер.}}{n}.$$

3.7. При исходных значениях параметров найти удельные приведенные затраты $Z_{пр.0}$, себестоимость пог. м скважины C_0 , относительный вес $G_{y.0}$ и удельную мощность $N_{y.0}$:

$$Z_{пр.0} = f(a, b, \dots K),$$

$$C_0 = f(a, b, \dots K),$$

$$G_{y.0} = f(a, b, \dots K),$$

$$N_{y.0} = f(a, b, \dots K).$$

3.8. Определить среднюю продолжительность операций при изменении каждого параметра на определенный интервал:

$$t_{оп.}^{a_1}, \text{ при } a_0 \rightarrow a_1 \quad (b_0, c_0, \dots, K_0) = \text{const};$$

$$t_{оп.}^{b_1}, \text{ при } b_0 \rightarrow b_1 \quad (a_0, c_0, \dots, K_{i-1}) = \text{const};$$

$$t_{оп.}^{K_1}, \text{ при } K_0 \rightarrow K_1 \quad (a_0, b_0, c_0, \dots, K_{i-1}) = \text{const}.$$

3.9. Найти разности между средней продолжительностью операции $t_{оп.}$ и величинами, полученными в шаге 3.8:

$$\Delta t_{оп.}^{a_1} = t_{оп.} - t_{оп.}^{a_1},$$

$$\Delta t_{оп.}^{b_1} = t_{оп.} - t_{оп.}^{b_1}$$

$$\Delta t_{оп.}^{K_1} = t_{оп.} - t_{оп.}^{K_1}.$$

3.10. Из величин, полученных в шаге 3.9, выбрать максимальную. Параметр (например, a_1), давший $\Delta t_{оп.}^{a_1} = \max$, обеспечивает наибольшее приращение производительности. Остается проверить его по ограничениям, найденным в шаге 3.7. Для этого:

3.10.1. В случае $n \cdot \Delta t_{оп.}^{a_1} < \Delta T$ найти удельные приведенные затраты и себестоимость при принятом значении данного параметра.

3.10.2. При $n \cdot \Delta t_{оп.}^{a_1} > \Delta T$ расчеты, связанные с оптимизацией и сокращением времени операций группы $T_{з.п.}$, закончить (следует понимать так: изменение параметра a_0 до величины a_1 обеспечило прирост производительности в заданной области ΔT). Поэтому следует перейти к сокращению операций группы T_1 .

3.11. Сравнить $Z_{пр.}^{a_1}$ и C^{a_1} со значениями $Z_{пр.0}$ и C_0 , найденными в шаге 3.7, если выполняется 3.10.1. При $Z_{пр.}^{a_1} < Z_{пр.0}$ и $C^{a_1} < C_0$ изменить параметр a_1 еще на интервал Δa и при новом значении параметра $a_2 = a_1 + \Delta a$ найти среднюю продолжительность операции $\Delta t_{оп.}^{a_2}$.

3.12. Определить разность между средней продолжительностью операции (3.6) и вновь полученной при шаге 3.11:

$$\Delta t_{оп.}^{a_1} = t_{оп.} - t_{оп.}^{a_2}.$$

3.13. Если величина $\Delta t_{оп.}^{a_2}$ опять наибольшая, то параметр a_2 изменить еще на интервал $a_3 = a_2 + \Delta a$ и далее следовать с шага 3.10. Если величина $\Delta t_{оп.}^{a_2}$ не является максимальной, то выбрать в шаге 3.9 другой параметр, обеспечивший наибольшую из имеющихся величин $\Delta t_{оп.}^i$ и все операции с ним производить с шага 3.10.

Если при выбранном параметре в шаге 3.11 окажется, что удельные приведенные затраты или себестоимость пог. м скважины, найденные с этим параметром, будут больше $Z_{пр.0}$ и C_0 , то от этого параметра пока следует отказаться и выбрать другой согласно шагу 3.10.

Согласно данного алгоритма исследуемые параметры изменять до тех пор, пока будет выполнено условие:

$$n \sum_{i=1}^m \Delta t_{оп.}^i \geq \Delta T,$$

или параметры не превысят свои предельные значения.

При $n \sum_{i=1}^m \Delta t_{оп.}^i \leq \Delta T$ перейти к группе операций T_1 и далее следовать с 3.3, попеременно сокращая продолжительность или количество операций групп T_1 и $T_{з.п.}$ за счет совершенствования бурильной установки.

Данная методика успешно апробирована авторами данной статьи при разработке нового бурового станка с гидроимпульсным механизмом [3].

Выводы

1. Разработана методика оценки технико-экономической эффективности машин для бурения подземных скважин малых диаметров, что позволяет оптимизировать параметры бурильной установки одновременно по нескольким критериям.
2. Исследование бурильных установок с различными типами привода (пневматическим, гидравлическим, электрическим, а также их комбинациями) согласно предлагаемой методике позволит оценить влияние типа привода на эффективность бурения уже на стадии проектирования установки.
3. Установлена взаимосвязь между операциями, выполняемыми приводами бурильных установок, выявлена степень влияния их на производительность бурения скважин.

3. Патент на ПМ 69135 РФ. МПК⁷ E21B 6/02, B25D 16/00. Буровой станок для проходки скважин в подземных условиях / А.В. Шадрин, А.Л. Саруев, Л.А. Саруев, А.А. Казанцев. Опубл. 10.12.2007 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саруев Л.А., Казанцев А.А. Влияние конструкции резьбовых соединений буровых штанг на эффективность работы буровой колонны // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 3. – С. 18–20.
2. Казанцев А.А., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Техника бурения подземных скважин и анализ динамики колонны штанг малого диаметра при вращательно-ударном нагружении. – Юрга: Изд-во ЮТИ ТПУ, 2007. – 127 с.

Поступила 03.12.2007 г.