

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

MODELING OF POWER-EFFICIENCY OF OIL AND GAS WELLS DRILLING

В. И. Колесов, Г. А. Хмара, А. Л. Портнягин

V. I. Kolesov, G. A. Khmara, A. L. Portnyagin

*Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень**Ключевые слова: моделирование; бурение нефтяных и газовых скважин; рейсовые динамические характеристики; оценка энергоэффективности; программное тестирование модели**Key words: modeling; drilling of oil and gas wells; scheduled normalized dynamic characteristics; power efficiency assessment; soft testing of models*

Повышение энергоэффективности технологических процессов является главной задачей государства. В ближайшей перспективе ей нет альтернатив. Это в первую очередь касается таких энергоемких технологических процессов, как бурение нефтяных и газовых скважин. Поиск путей решения проблемы немаловажен без создания инженерного алгоритмического обеспечения, базирующегося на начальном этапе на результатах имитационного моделирования. Делается попытка приблизиться к решению проблемы.

В задачах исследования динамики бурения нефтяных и газовых скважин широко используется подход, основанный на фундаментальных представлениях теории механических систем с распределенными параметрами [1]. Приведенные в работе [1] результаты являются глубоким обобщением многочисленных экспериментальных данных, порожденных реальной практикой, и подвигают к использованию предложенного подхода для моделирования как рейсовых динамических характеристик бурения скважин, так и оценки энергоэффективности технологического процесса.

Основным посылом к моделированию является установленный в работе [1] факт общности дифференциального уравнения (предложенного Р. А. Бадаловым) для широкого диапазона условий применения

$$\frac{dV}{dt} = -\mu \cdot V^k, \quad (1)$$

где V — механическая скорость бурения, $V(0)=V_0$; μ и k — константы, причем $\mu \geq 0$, а $k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$; $k_{\min} < 0$; $k_{\max} > 0$.

Учитывая, что процесс бурения складывается из последовательности отдельных рейсов, представляет практический интерес исследование динамики бурения скважины в пределах каждого из них [2]. При рассмотрении одного рейса будем решать задачу с позиции теории подобия путем перехода к безразмерным величинам: механической скорости бурения $V_n = V/V_0$, проходки за рейс $H_n = H/H_{\max}$ и времени бурения $T_n = t/t_{\max}$. Задача при этом сводится к установлению взаимосвязи между нормированными величинами V_n , H_n и T_n на основе решения дифференциального уравнения (1).

Рассмотрим вначале модель $V_n(T_n)$, используя уравнение (1). Его решение найдем, разделяя переменные и учитывая диапазоны изменения V и t соответственно

$$\begin{aligned} V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \text{ (здесь } V_{\max} = V_0 \text{) и } 0 \leq t \leq t_{\max}. \\ \frac{dV}{V^k} = -\mu \cdot dt; \\ \int_{V_0}^V V^{-k} dV = -\mu \int_0^t dt, \end{aligned} \quad (2)$$

что при $k \neq 1$ дает

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^{1-k} V_n^{1-k} = 1 - \frac{\mu \cdot (1-k)}{V_0^{1-k}} \cdot t = 1 - B(k) \cdot t \text{ (здесь } B(k) = \frac{\mu \cdot (1-k)}{V_0^{1-k}}),$$

или

$$V_n = [1 - B(k) \cdot t]^{\frac{1}{1-k}} \quad (3)$$

Множитель $B(k)$ найдем, задавая минимальное значение нормированной механической скорости $V_n = V_{n\min}$ в конце рейса (то есть при $t = t_{\max}$), тогда

$$V_{n\min} = [1 - B(k) \cdot t_{\max}]^{\frac{1}{1-k}}, \text{ то есть } B(k) = \frac{1 - V_{n\min}^{1-k}}{t_{\max}}.$$

Подстановка $B(k)$ в (3) дает

$$V_n = \left[1 - \frac{1 - V_{n\min}^{1-k}}{t_{\max}} \cdot t\right]^{\frac{1}{1-k}} = [1 - (1 - V_{n\min}^{1-k}) \cdot T_n]^{\frac{1}{1-k}}. \quad (4)$$

Следуя [3], примем $V_{n\min} = 0,5$, тогда

$$V_n = \left[1 - \frac{1 - 0,5^{1-k}}{t_{\max}} \cdot t\right]^{\frac{1}{1-k}} = [1 - (1 - 0,5^{1-k}) \cdot T_n]^{\frac{1}{1-k}}.$$

Если же $k = 1$, то, в соответствии с (2), $\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \ln(V_n) = -\mu \cdot t$, то есть

$$V_n = \exp(-\mu \cdot t). \quad (5)$$

$$V_n = \left[1 - \frac{1 - V_{n \min}^{2-k}}{H_{\max}} \cdot H \right]^{\frac{1}{2-k}} = \left[1 - (1 - V_{n \min}^{2-k}) \cdot H_n \right]^{\frac{1}{2-k}}. \quad (9)$$

Задавая в соответствии с [3], $V_{n \min} = 0,5$, получим

$$V_n = \left[1 - (1 - 0,5^{2-k}) \cdot H_n \right]^{\frac{1}{2-k}}. \quad (10)$$

Если же $k=2$, то решение уравнения (7) имеет вид

$$\ln(V/V_0) = \ln(V_n) = -\mu \cdot H. \quad (11)$$

Множитель μ определяется из условия $V_n = V_{n \min}$, когда $H = H_{\max}$, $\ln(V_{n \min}) = -\mu \cdot H_{\max}$, что дает $\mu = -\ln(V_{n \min})/H_{\max}$. Подстановка μ в (11) приводит к следующему итогу:

$$\ln(V_n) = \ln(V_{n \min}) \cdot H/H_{\max} = \ln(V_{n \min}) \cdot H_n$$

или

$$V_n = V_{n \min}^{H_n}. \quad (12)$$

Полагая, что $V_{n \min} = 0,5$, получим $V_n = 0,5^{H_n}$.

Соотношения (9) и (12) позволяют структурно идентифицировать модель $H_n(V_n)$ как при $k \neq 2$, так и при $k=2$:

если $k=2$, то

$$H_n(V_n) = \ln(V_n)/\ln(V_{n \min}), \quad (13)$$

иначе

$$H_n(V_n) = (1 - V_0^{2-k}) / (1 - V_{n \min}^{2-k}). \quad (14)$$

Графики функции $V_n(H_n)$ при $V_{n \min} = 0,5$ приведены на рис. 2.

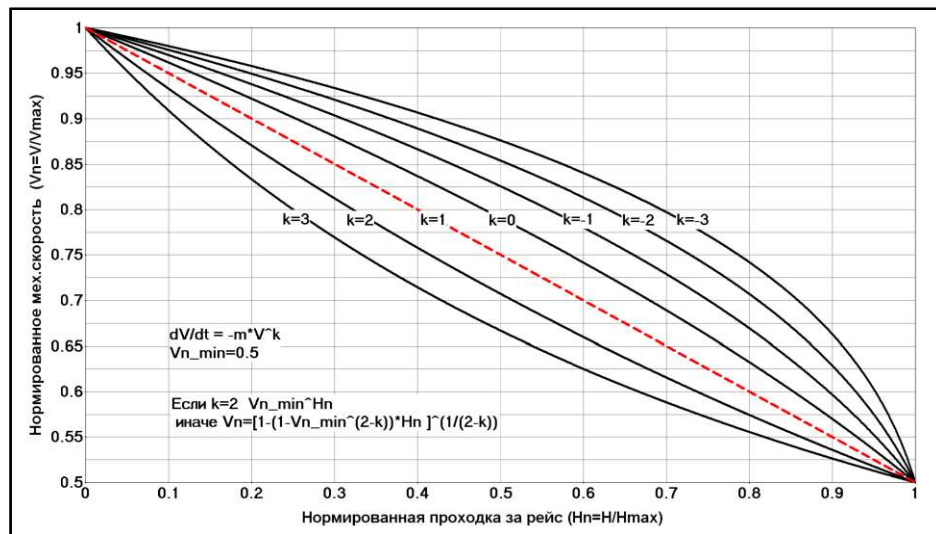


Рис. 2. Графики функции $V_n(H_n)$ при $V_{n \min} = 0,5$

Рассмотрим далее модель $H_n(T_n)$. В соответствии с (4) при $k \neq 1$

$$T_n = \frac{1 - V_n^{1-k}}{1 - V_{n \min}^{1-k}},$$

при этом, если $k \neq 2$, выполняется соотношение (9), что дает

$$T_n = \frac{1 - V_n^{1-k}}{1 - V_{n \min}^{1-k}} = \frac{1 - [1 - (1 - V_{n \min}^{2-k}) \cdot H_n]^{1-k}}{1 - V_{n \min}^{1-k}},$$

тогда

$$H_n = \frac{1 - [1 - T_n(1 - V_{n \min}^{1-k})]^{1-k}}{1 - V_{n \min}^{2-k}}. \quad (15)$$

Если же $k = 1$, то, в соответствии с (6), $T_n = \frac{\ln(V_n)}{\ln(V_{n \min})}$ и, поскольку $k \neq 2$, используя (9), получим

$$T_n = \frac{\ln(V_n)}{\ln(V_{n \min})} = \frac{\ln\{[1 - (1 - V_{n \min}^{2-k}) \cdot H_n]^{1-k}\}}{\ln(V_{n \min})},$$

то есть

$$H_n = \frac{1 - V_{n \min}^{(2-k)T_n}}{1 - V_{n \min}^{2-k}}. \quad (16)$$

График функции $H_n(T_n)$ для ряда значений $V_{n \min}$ приведен на рис. 3.

При $k = 2$ выполняется условие (13), тогда с учетом (4) получим

$$H_n = \frac{\ln(V_n)}{\ln(V_{n \min})} = \frac{\ln[1 - (1 - V_{n \min}^{1-k}) \cdot T_n]}{(1-k) \cdot \ln(V_{n \min})}.$$

Как видим, H_n начинает принимать отрицательные значения, что лишено физического смысла.

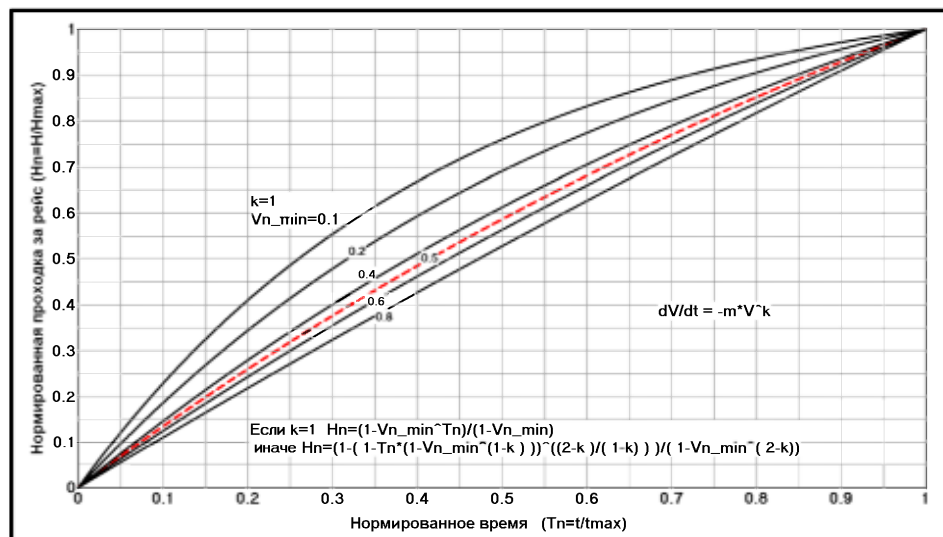


Рис. 3. График функции $H_n(T_n)$

Подводя итог, следует отметить, что полученные результаты ориентированы на формирование оценок эффективности процесса бурения. Существует традиционный ряд таких оценок [4], не включающий оценки энергоэффективности $\mathcal{E}_p$, характеризующей энергосберегающий эффект от увеличения рейсовой скорости V_p . Предлагается вариант оценки $\mathcal{E}_p$ в виде

$$\mathcal{E}_p = \frac{W_s - W_p}{W_p} = \frac{W_s}{W_p} - 1, \quad (17)$$

где W_s — расход электрической энергии, рассчитанный по данным рабочего проекта [5]; W_p — расход электрической энергии за рейс, $W_p = N_p \cdot t_p$, кВт ч; N_p — суммарная мощность используемых синхронных двигателей буровых насосов, асинхронных двигателей буровой лебедки и прочих энергопотребителей за рейс, кВт; t_p — время бурения рейса, ч; $W_s = a \cdot H$ кВт ч; a — норма расхода электроэнергии на заданном интервале (определяемая по данным рабочего проекта), учитывающая особенности строительства скважины, кВт ч/м; $H_{э\kappa\theta}$ — эквивалентная глубина скважины в рассматриваемом интервале $H_{э\kappa\theta} = H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}$, м; индексы p и s относятся к рейсовым и сметным характеристикам соответственно.

С учетом принятых обозначений соотношение (17) принимает вид

$$\mathcal{E}_p = \frac{a \cdot H_{э\kappa\theta}}{N_p \cdot t_p} - 1 = \frac{N_s \cdot t_s \cdot H_{э\kappa\theta}}{H_s \cdot N_p \cdot t_p} - 1 = \frac{V_p / V_s}{N_p / N_s} - 1, \quad (18)$$

где $V_p = \frac{H_{э\kappa\theta}}{t_p}$ — рейсовая скорость, м/ч, $V_s = \frac{H_s}{t_s}$ — сметная рейсовая скорость, определяемая по данным проекта, const.

Проанализируем влияние рейсовой скорости V_p на энергосбережение, полагая, что вся затраченная мощность N_s идет на разрушение породы, то есть $N_p = N_s$, тогда соотношение (18) заметно упрощается

$$\mathcal{E}_p = \frac{V_p}{V_s} - 1. \quad (19)$$

По своей сути V_p — это средняя механическая скорость на интервале бурения с учетом дополнительных временных потерь. Ее можно представить в виде

$$V_p = \frac{H_{\max}}{t_{\max} + t_d} = \frac{H_{\max}}{t_{\max}(1 + \alpha)} = \frac{\overline{V_b}}{1 + \alpha}, \quad (20)$$

где $\alpha = t_d / t_{\max}$; $\overline{V_b} = V_0 \cdot \overline{V_{bn}}$ — средняя механическая скорость бурения без учета дополнительного времени; $\overline{V_{bn}}$ — средняя нормированная скорость бурения,

$$\overline{V_{bn}} = \frac{1}{T_n} \int_0^1 V_n(T_n) dT_n.$$

Результаты расчета $\overline{V_{bn}}$ для ряда значений коэффициента k приведены на рис. 4. Используя линейную аппроксимацию функции $\overline{V_{bn}}(k)$, соотношение (20) представим в виде

$$V_p = \frac{\overline{V_b}}{1 + \alpha} = \frac{V_0 \cdot \overline{V_{bn}}(k)}{1 + \alpha} = \frac{V_0 \cdot (0,7485 - 0,027 \cdot k)}{1 + \alpha}. \quad (21)$$

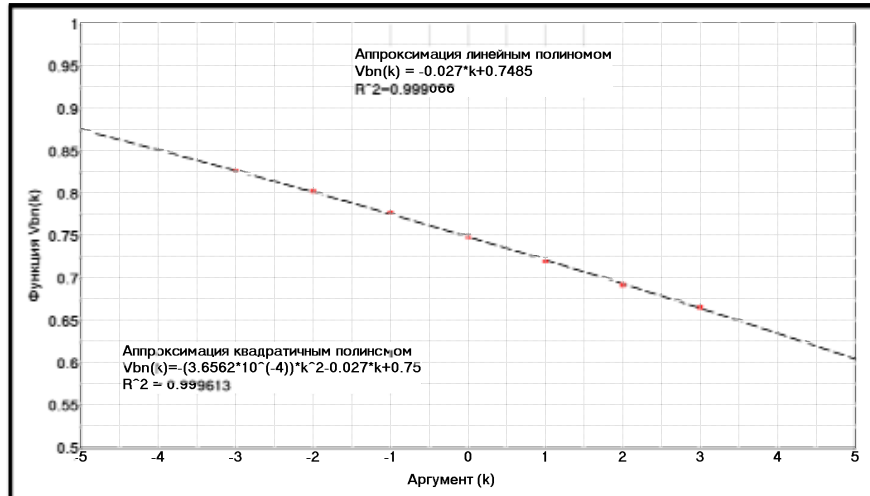


Рис. 4. График зависимости $\overline{V_{bn}}$ от коэффициента k

Подстановка (21) в (19) дает

$$\mathcal{P} = \frac{V_0 \cdot (0,7485 - 0,027 \cdot k)}{V_s(1 + \alpha)} - 1. \quad (22)$$

Учитывая, что рейс заканчивают по достижению заданной минимальной механической скорости бурения, представляет практический интерес ее связь с энергосберегающим эффектом.

Покажем это на примере модели с $k=1$. Учитывая, что $T_n = 1$, то, в соответствии с

$$(6), \quad \overline{V_{bn}} = \frac{1}{T_n} \int_0^1 V_n(T_n) dT_n = \frac{1}{T_n} \int_0^1 V_{n \min}^{T_n} dT_n = \frac{V_{n \min} - 1}{\ln(V_{n \min})}, \text{ то есть}$$

$$V_p = \frac{\overline{V_b}}{1 + \alpha} = \frac{V_0 \cdot \overline{V_{bn}}}{1 + \alpha} = \frac{V_0 \cdot (V_{n \min} - 1)}{(1 + \alpha) \cdot \ln(V_{n \min})}, \text{ тогда } \mathcal{P} = \frac{V_0 \cdot (V_{n \min} - 1)}{V_s(1 + \alpha) \cdot \ln(V_{n \min})} - 1. \quad (23)$$

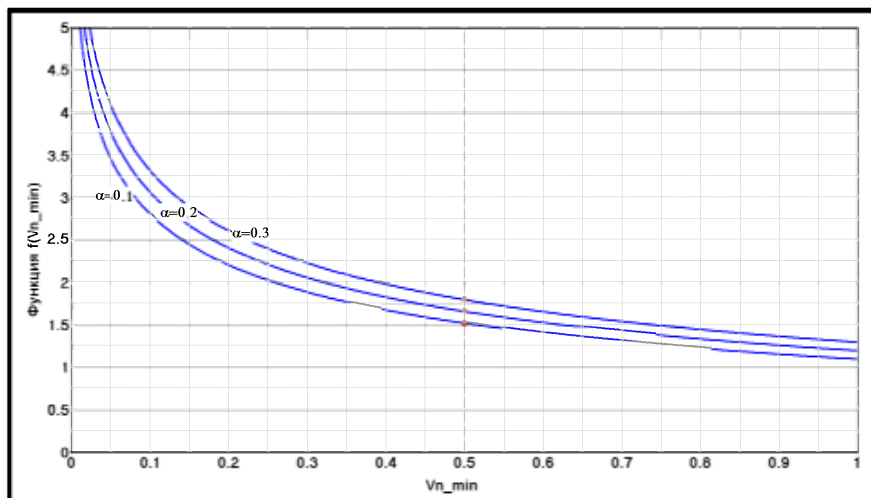


Рис. 5. Область допустимых значений $\frac{V_0}{V_s} = f(V_{n \min})$

Для обеспечения энергосберегающего эффекта необходимо, чтобы соблюдалось неравенство

$$\mathcal{E}_p > 0 \Rightarrow \frac{V_0}{V_s} < (1 + \alpha) \frac{\ln(V_{n \min})}{(V_{n \min} - 1)}. \quad (24)$$

На рис. 5 показана область допустимых значений $\frac{V_0}{V_s} = f(V_{n \min})$. Штриховой линией выделен вариант окончания бурения, рекомендованный В. С. Федоровым.

На рис. 6 представлены результаты расчета $\mathcal{E}_p$ при различных α для $\frac{V_0}{V_{n \min}} = 1,6667$.

Их анализ показывает, что даже при окончании бурения с рекомендуемой скоростью $V_{n \min} = 0,5$ может наблюдаться как положительный, так и отрицательный энергосберегающий эффект, определяемый в итоге долей дополнительных временных затрат α .

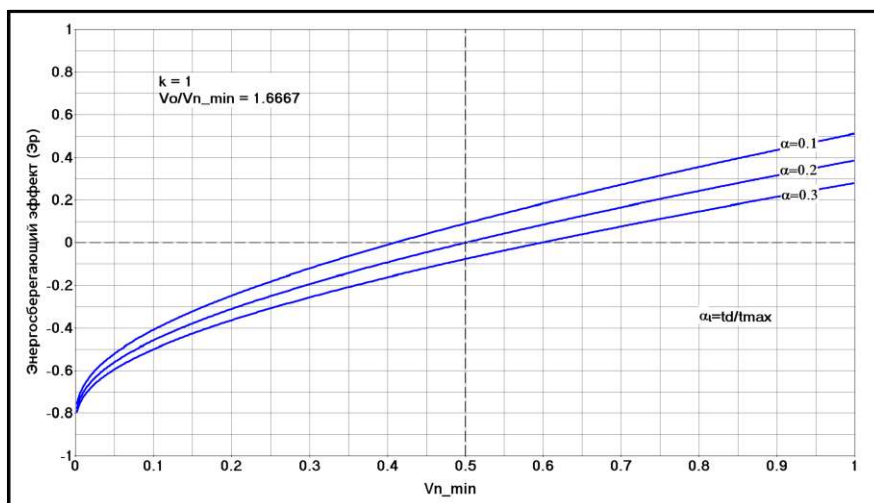


Рис. 6. График зависимости $\mathcal{E}_p$ от $V_{n \min}$ при различных α

Таким образом, во-первых, получены базовые модели рейсовых динамических характеристик процесса бурения нефтяных и газовых скважин (см. 4, 6, 9, 12, 15 и 16), и, во-вторых, предложена прогнозная модель оценки энергоэффективности технологического процесса в пределах рейса (23). Выполнено программное тестирование моделей.

Список литературы

1. Юнин Е. К. Динамика бурения нефтяных и газовых скважин. / Учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2004.
2. Колесов В. И. Моделирование рейсовых динамических характеристик процесса бурения нефтяных и газовых скважин // Энергосбережение и инновационные технологии в ТЭК: материалы Всероссийской НТК / отв. ред. А. Л. Портнягин. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2013. – С. 370-377.
3. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. – М.: Гостоптехиздат, 1951. – 248 с.
4. Балаба В. И. Обеспечение результативности и эффективности бурения нефтяных и газовых скважин на основе системного подхода: автореф. дис...д-ра техн. наук. – М., 2010. – 50 с.
5. Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство скважин на нефть и газ: ВСН 39-86 / Ведомственные строительные нормы. – Изд. офиц. – М.: Типография ХОЗУ Миннефтепрома, 1987. – 156 с.

Сведения об авторах

Колесов Виктор Иванович, к. т. н., доцент кафедры «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: vikolesov@yandex.ru

Хмара Гузель Азатовна, к. т. н., доцент кафедры «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: guzelkhmara@rambler.ru

Information about the authors

Kolesov V. I., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Electric power engineering», Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: vikolesov@yandex.ru

Khmara G. A., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Electric power engineering», Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: guzelkhmara@rambler.ru

Портнягин Алексей Леопидович, к. т. н., заведующий кафедрой «Электроэнергетика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: pol@tsogu.ru

Portnyaguin A. L., Candidate of Science in Engineering, head of the chair «Electric power engineering», Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: pol@tsogu.ru