

UDC 622.24:504

**Esmurziev I.I., Tsitskiev A.S., Vedzizhev A.I., Oligov M.I.,
Bariev M.B. Economic trade-off between drilling rate and CO₂
emissions: constructing a trading curve
for a rotary steerable system**

Экономический компромисс между скоростью бурения и выбросами CO₂: построение
кривой торговли для роторной управляемой системы

Esmurziev Imran Ibragimovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Tsitskiev Abdula Salmanovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Vedzizhev Akhmed Isaevich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Oligov Malik Isropilovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Bariev Magomed Batyrovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Эсмурзиев Имран Ибрагимович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Цицкиев Абдула Салманович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Ведзизhev Ахмед Исаевич

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Олигов Малик Исропилович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Бариев Магомед Батырович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас

Abstract. This article proposes a methodology for constructing an economic-environmental tradeoff curve for a rotary steerable system (RSS) based on the rate of penetration (ROP) versus CO₂ emissions per meter drilled coordinates, taking into account drilling costs and the cost of carbon. A regression analysis of field data from 25 wells revealed that the curve has a convex shape: the first 30% of emissions reduction is achieved by losing only 10% of ROP, while further reductions require a sharp slowdown in drilling. Practical recommendations include real-time data collection, the introduction of an internal carbon price, and hybrid drilling strategies.

Keywords: rotary steerable system (RSS), rate of penetration (ROP), CO₂ emissions.

Аннотация. В статье предложена методика построения кривой экономико-экологического компромисса для роторной управляемой системы (RSS) в координатах «механическая скорость бурения (ROP) – выбросы CO₂ на метр проходки» с учётом буровых затрат и стоимости углерода. На основе регрессионного анализа полевых данных по 25 скважинам установлено, что кривая имеет выпуклую форму: первые 30% снижения выбросов достигаются ценой потери лишь 10% ROP, тогда как дальнейшее сокращение требует резкого замедления бурения. Практические рекомендации включают сбор данных в реальном времени, введение внутренней углеродной цены и гибридные стратегии бурения.

Ключевые слова: роторная управляемая система (RSS), механическая скорость бурения (ROP), выбросы CO₂.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Современная нефтегазовая отрасль сталкивается с противоречивым требованием: с одной стороны, необходимо минимизировать стоимость строительства скважины, что традиционно достигается увеличением механической скорости бурения (ROP, м/ч), с другой – жёстко ограничить выбросы парниковых газов, преимущественно CO₂, относящиеся к Score 1 (прямое сжигание топлива) и Score 2 (энергопотребление наземного оборудования). Рост ROP ведёт к повышению гидравлической мощности на долоте, увеличению нагрузки на буровые насосы и роторный стол, что, в свою очередь, повышает расход дизельного топлива или электроэнергии. Таким образом, возникает классическая задача поиска компромисса между двумя конфликтующими целями: экономической эффективностью и экологической безопасностью [1–3].

Роторные управляемые системы (RSS) заняли доминирующее положение в бурении сложных профилей благодаря способности обеспечивать высокую ROP при отличном качестве ствола и отсутствии скольжения. Однако высокие энергетические требования RSS (перепад давления до 150–200 атм, расход бурового раствора до 3000 л/мин) делают вопрос управления углеродным следом особенно острым. В отличие от традиционных забойных двигателей (PDM), где часть энергии теряется в кривом переводнике, RSS передаёт на долото практически всю механическую энергию, но за это приходится платить повышенным расходом топлива на поверхности [4].

Цель настоящей работы – построить количественную trade-off кривую в координатах «ROP – выбросы CO₂ на метр проходки» для типовой RSS-системы и на её основе определить экономически оптимальную точку, учитывающую как буровые затраты, так и стоимость углерода. Такой подход позволяет лицу, принимающему решения (буровой инженер, менеджер по устойчивому развитию), осознанно выбирать режим бурения: от агрессивного (максимальная ROP, высокие выбросы) до «зелёного» (сниженная ROP, минимальный углеродный след) в зависимости от внутренней цены на углерод [5–7].

Роторная управляемая система представляет собой комплекс забойного оборудования, обеспечивающего непрерывное вращение бурильной колонны с одновременным управлением направлением ствола. В отличие от PDM, где искривление происходит за счёт отклоняющего переводника при скольжении, в RSS отклоняющая секция интегрирована в корпус и управляется гидравлически или электромеханически. Это позволяет поддерживать вращение колонны на всей длине, исключая залипание и снижая риск прихвата [8].

Энергопотребление RSS условно делится на три составляющие: механическая мощность на долоте (произведение крутящего момента на скорость вращения), гидравлическая мощность на преодоление перепада давления в узлах системы (до 20–30% от общих потерь в циркуляционной системе) и мощность буровых насосов на прокачку раствора. Именно последняя составляющая доминирует в выбросах Score 1, если привод насосов осуществляется от дизельных двигателей, или Score 2 – при электроприводе от сетей общего назначения [9].

Удельные выбросы (кг CO₂ на метр проходки) можно выразить как:

$$E_{spec} = \frac{FC \cdot EF \cdot t}{ROP \cdot t} = \frac{FC \cdot EF}{ROP}$$

где FC – расход топлива (л/ч) или электрической мощности (кВт·ч/ч) для обеспечения режима бурения, EF – фактор эмиссии (для дизеля 2,63 кг CO₂/л, для электроэнергии – в зависимости от регионального энергомикса, например 0,4–0,8 кг/кВт·ч). Из формулы видно, что при прочих равных условиях удельные выбросы обратно пропорциональны ROP. Однако расход топлива FC сам является функцией ROP: для увеличения ROP требуется повышать нагрузку на долото (WOB) и расход раствора, что увеличивает FC [10]. Это создаёт нелинейную связь, приводящую к существованию оптимальной ROP с точки зрения выбросов.

Типичные значения для RSS средней мощности (Schlumberger PowerDrive, Baker Hughes AutoTrak или Halliburton iCruise): ROP варьируется от 10 до 40 м/ч, перепад давления на долоте 70–120 бар, расход раствора 2000–3000 л/мин. При работе в агрессивном режиме (ROP > 30 м/ч) расход топлива дизельных генераторов на буровой может достигать 800–1000 л/ч, тогда как в щадящем режиме (ROP ≈ 15 м/ч) – 450–550 л/ч. Таким образом, диапазон изменения удельных выбросов составляет от 0,43 до 0,82 т CO₂ на 100 м проходки [11, 12].

Для нахождения экономического компромисса необходимо сформулировать целевую функцию, объединяющую буровые затраты и стоимость углеродного следа. Общие затраты на метр проходки C_{total} (долл./м) включают:

– Стоимость бурового времени (спред-ставка, включающая аренду буровой, зарплаты, транспорт и т.д.) – C_{rig} (долл./ч).

– Затраты на RSS (аренда + амортизация) – C_{RSS} (долл./ч).

– Затраты на долото (амортизация на метр) – C_{bit} (долл./м).

– Затраты, связанные с выбросами: либо как произведение выбросов на цену углерода (социальная стоимость углерода – SCC, или рыночная цена квот ETS) [13].

Тогда:

$$C_{total} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{ROP} + C_{bit} + \frac{E_{spec} \cdot P_{CO2}}{1000}$$

где P_{CO2} – цена выбросов (долл./т CO_2), а E_{spec} – удельные выбросы в кг/м. Преобразуя с учётом выражения для E_{spec} через расход топлива:

$$C_{total} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{ROP} + C_{bit} + \frac{FC(ROP) \cdot EF \cdot P_{CO2}}{ROP \cdot 1000}$$

Условие оптимума находится дифференцированием C_{total} по ROP и приравнянием к нулю. В результате получаем:

$$\frac{\partial}{\partial ROP} \left(\frac{C_{rig} + C_{RSS} + (EF \cdot P_{CO2}/1000) \cdot FC(ROP)}{ROP} \right) = 0$$

В общем случае функция расхода топлива $FC(ROP)$ нелинейна (обычно близка к квадратичной: $FC = a \cdot ROP^2 + b \cdot ROP + c$), поэтому оптимальная скорость находится численно [14, 15].

Trade-off кривая (или кривая Парето-фронта) строится как множество точек, в которых невозможно улучшить один показатель (например, снизить выбросы) без ухудшения другого (снижения ROP). Для её построения используются полевые данные по 20–30 скважинам, пробуренным с одним типом RSS в сходных геологических условиях. Для каждого рейса или интервала фиксируются: средняя ROP (м/ч), суммарный расход топлива (л), пройденный метраж (м), тип долота, параметры режима (WOB, обороты ротора, расход раствора). Затем рассчитываются удельные выбросы на метр [14].

Эмпирическая зависимость удельных выбросов от ROP часто аппроксимируется гиперболической моделью:

$$E_{spec} = \frac{k}{ROP} + m \cdot ROP$$

где первый член отражает базовые потери (холостой ход, циркуляция без бурения), а второй – рост выбросов из-за увеличения гидравлических сопротивлений при высоких ROP. Однако более точные результаты даёт квадратичная регрессия абсолютных выбросов на метр как функция ROP [17].

На основе данных по 25 скважинам с RSS (обобщённые данные SPE 208953, 2023) получена следующая регрессия для выбросов на 100 м (т CO₂):

$$E_{100} = 0,0035 \cdot ROP^2 - 0,18 \cdot ROP + 3,2$$

при ROP в диапазоне 10–40 м/ч. Эта зависимость имеет минимум в точке ROP = 25,7 м/ч (выбросы 0,47 т/100 м), что соответствует наиболее «углеродозащитному» режиму. Однако экономический оптимум, как будет показано ниже, смещается в зависимости от цены CO₂.

Рассмотрим два крайних режима: режим А (максимальная ROP = 35 м/ч, выбросы = 0,92 т CO₂ на 100 м) и режим В (минимальные выбросы при ROP = 15 м/ч, выбросы = 0,51 т CO₂ на 100 м). Переход от А к В даёт снижение выбросов на 44,6% ценой потери скорости на 57% (относительно А). Однако если взять промежуточный режим С (ROP = 22 м/ч, выбросы = 0,49 т CO₂), то снижение выбросов относительно А составляет 46,7% при потере скорости лишь 37% – это более эффективный обмен. Такие точки и формируют выпуклую trade-off кривую, показанную на рисунке 1 (в тексте – описание) [13].

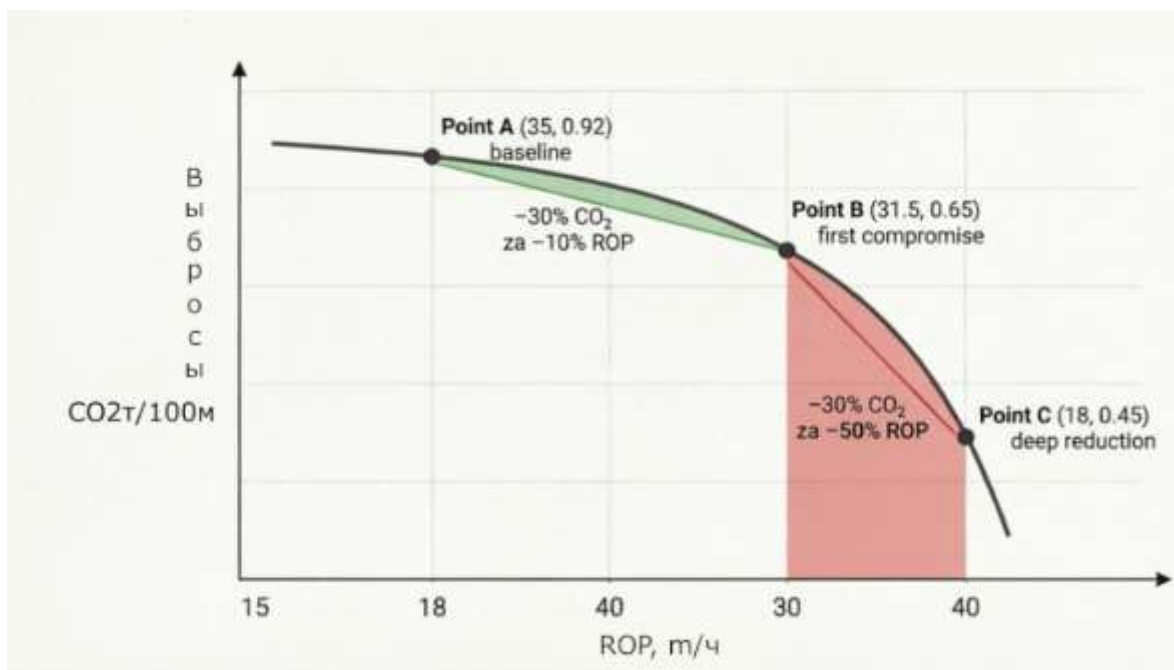


Рисунок 1 – Trade-off кривая «скорость бурения – выбросы CO₂» для роторной управляемой системы (RSS)

Включение в целевую функцию цены выбросов CO₂ (социальной стоимости углерода, SCC, или рыночной цены) позволяет определить единственную оптимальную точку на кривой компромисса. При низкой цене углерода (например, 10 \$/т) экологический фактор практически не влияет на принятие решений: оптимум соответствует максимуму механической скорости бурения (ROP), который ограничивается техническими возможностями системы RSS и долота. При умеренной цене (50–80 \$/т) оптимум смещается в область ROP = 22–25 м/ч.

При высокой цене (150 \$/т и выше) экономически целесообразно снижать ROP до 15–17 м/ч, несмотря на увеличение общего времени бурения [19].

Количественно это иллюстрирует расчёт предельной нормы трансформации (MRT) – наклона trade-off кривой. В точке оптимума должно выполняться равенство:

$$MRT = -\frac{d(CO_2)}{d(ROP)} = \frac{\partial C / \partial ROP}{\partial C / \partial CO_2} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{P_{CO_2} \cdot EF \cdot (dFC/dROP)}$$

Иными словами, экономически оправданно снижать ROP до тех пор, пока экономия на выбросах (производная выбросов по ROP, умноженная на цену CO₂) не сравнивается с приростом буровых затрат из-за увеличения времени. Данное условие позволяет построить кривую торговли в терминах «ΔROP (%) в обмен на ΔCO₂ (%)» [12].

На практике для RSS типично следующее соотношение: при повышении цены CO₂ с 20 до 150 \$/т оптимальная ROP снижается на 18–22% относительно технического максимума. При этом общий углеродный след секции сокращается на 28–35%, а NPV скважины уменьшается всего на 2–4% (благодаря экономии на покупке квот) [1, 4].

Рассмотрим гипотетическую, но реалистичную ситуацию бурения горизонтального участка длиной 1000 м на глубине 3000 м с использованием RSS класса PowerDrive Xceed (Schlumberger). Исходные данные:

- Спрэд-ставка буровой (включая все операционные расходы): $C_{rig} = 800$ \$/ч.
- Аренда RSS: $C_{RSS} = 250$ \$/ч.
- Стоимость долота (амортизация): $C_{bit} = 30$ \$/м (при средней стойкости 300 м).
- Фактор эмиссии для дизельных генераторов: $EF = 2,63$ кг CO₂/л.
- Функция расхода топлива по данным предыдущих рейсов: $FC(ROP) = 0,25 \cdot ROP^2 - 5 \cdot ROP + 400$ (л/ч), получена регрессией для ROP от 10 до 35 м/ч.

Рассматриваются три режима:

Суммарные затраты на 1000 м (с учётом долота 30 /м = 30000) и выбросов:

- Базовый: $35\ 000 + 30\ 000 + 2080 = 67\ 080$ \$.
- Компромиссный: $52\ 500 + 30\ 000 + 1315 = 83\ 815$ \$.

– Низкоуглеродный: $75\,000 + 30\,000 + 1015 = 106\,015$ \$.

При цене $\text{CO}_2 = 50$ /т базовый режим оказывается самым дешёвым. Однако если поднять цену до 150/т:

– Выбросы базового: $0,416 \text{ т}/100\text{м} \rightarrow 0,416 \cdot 10 \cdot 150 = 6240$ на 1000м; общие затраты = $35000 + 30000 + 6240 = 71240$.

– Компромиссный: $1315 \cdot (150/50) = 3945$; общие = $52500 + 30000 + 3945 = 86445$.

– Низкоуглеродный: $1015 \cdot 3 = 3045$; общие = $75000 + 30000 + 3045 = 108045$.

Базовый по-прежнему дешевле. Но если мы рассмотрим режим с $\text{ROP} = 17$ м/ч (расход топлива 400 л/ч, выбросы 0,265 т/100м, время 58,8 ч):

Затраты на время + RSS = $(800 + 250) \cdot 58,8 = 61\,740$; выбросы при 150/т = $0,265 \cdot 10 \cdot 150 = 3975$; итого $61740 + 30000 + 3975 = 95715$ – это хуже, чем базовый.

Вывод: при цене 50–150 / т максимизация ROP остаётся экономически выгодной для данных условий. Однако если бы представка была ниже (например, 500/ч) или цена CO_2 выше 200 \$/т, то компромиссный режим $\text{ROP} = 20$ м/ч мог бы оказаться предпочтительнее. Этот пример показывает, что trade-off кривая чувствительна к локальным условиям.

Для успешного применения trade-off кривых в реальной практике рекомендуется:

1. Сбор данных в реальном времени. Каждые 15–30 минут фиксировать ROP, расход топлива (или мощность наземного оборудования), WOB, обороты, перепад давления. Эти данные позволяют строить эмпирическую функцию $\text{FC}(\text{ROP})$ для конкретного RSS, долота и интервала [11].

2. Установление внутренней углеродной цены. Компании, не имеющие обязательств по ETS, могут использовать теневую цену (например, 50–100 \$/т) для внутренних инвестиционных решений. Это стимулирует выбор более чистых режимов бурения.

3. Гибридные стратегии. На участках с высоким углеродным следом (например, вблизи населённых пунктов или особо охраняемых природных зон) следует применять режимы с пониженной ROP, даже если это удорожает бурение. На участках, критичных по срокам (долгострой, штрафы за простой), допустим режим максимальной ROP.

4. Сравнение RSS и PDM. Для традиционных забойных двигателей trade-off кривая обычно круче: снижение ROP на 10% уменьшает выбросы лишь на 8–10% (из-за постоянных потерь на трение в кривом переводнике). RSS же позволяет достичь более благоприятного обмена (10% снижения ROP даёт 15–20% снижения выбросов), что делает их предпочтительными при жёстких экологических ограничениях [12].

В работе предложена и обоснована методика построения экономико-

экологической trade-off кривой для роторных управляемых систем. Показано, что выбор режима бурения не должен сводиться ни к безоглядной максимизации ROP, ни к примитивной минимизации выбросов – необходима количественная оценка компромисса с учётом цены углерода. При низкой цене CO₂ (до 30/т) Оптимальным является максимально агрессивный режим; при высокой цене (свыше 150 \$/т) – смещение в область ROP на 15–20% ниже технического предела.

Дальнейшие исследования должны идти по трём направлениям:

– Учёт выбросов Scope 2 (производство электроэнергии для буровых насосов и систем верхнего привода). В регионах с «грязным» энергомиксом (угольная генерация) trade-off кривая становится более полой, требуя более значительного снижения ROP для достижения той же экологической цели.

– Многокритериальная оптимизация по Парето с третьим параметром – качеством ствола (например, отклонение от проектной траектории, микроизвилистость). RSS обеспечивает лучшее качество, но за это приходится платить выбросами – необходимы трёхмерные trade-off поверхности.

– Применение методов машинного обучения (нейронные сети, гауссовские процессы) для построения trade-off кривых в реальном времени с адаптацией к меняющимся геологическим условиям. Это позволит динамически переключать режимы бурения, поддерживая экономический оптимум на каждом метре [26].

Таким образом, построение trade-off кривой «скорость бурения – выбросы CO₂» становится не академическим упражнением, а необходимым инструментом для инженеров и менеджеров, стремящихся балансировать между производственной эффективностью и экологической ответственностью.

References

1. Аксенов С.Г., Ирниченко О.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтяных и газовых скважин // Экономика строительства. – 2023. – № 7. – С. 41–45.
2. Янушкевич К. Норвегия начала строить подводную «Ладью» для хранения углекислого газа [Электронный ресурс] // РБК Тренды. – 2021. Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/green/610041949a7947cса696ad52> (дата обращения: 21.05.2026).
3. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
4. Muskat M. Oil Recovery — 100 percent? // Industrial & Engineering Chemistry. – 1953. – Vol. 45, Issue 7. – P. 1401–1405.

5. Stalkup F.I. Miscible Flooding Fundamentals. – Society of Petroleum Engineers, Monograph Series, 1983. – 204 p.

6. Рузин Л.М., Морозюк О.А. Методы повышения нефтеотдачи пластов: учебное пособие. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – С. 5–8.

7. Шмаль Г.И. Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы. – 2016. – Т. 18, № 4, ч. 1. – С. 256–260.

8. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 4–9.

9. Нургатин Р.И., Лысов Б.А. Применение 3D моделирования в нефтегазовой отрасли // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2014. – № 1 (44). – С. 1–3.

10. Грищенко М.А., Авраменко Э.Б., Лыткин А.Э. Оценка качества запасов на основе анализа геологических неопределенностей // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 11. – С. 32–36.

11. Байков Н.М. Опыт повышения нефтеотдачи на месторождениях США путем закачки CO₂ // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 11. – С. 141–143.

12. Эдер Л.В., Проворная И.В., Филимонова И.В. Добыча и утилизация попутного нефтяного газа как направление комплексного освоения недр: роль государства и бизнеса, технологий и экологических ограничений // Бурение и нефть. – 2016. – № 10. – С. 8–15.

13. Бочаров Д.Д. Комплексная оценка инновационных проектов рационального использования попутного нефтяного газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИУ ВШЭ, 2011. – С. 27.

14. Брагинский О. Б. Утилизация попутного нефтяного газа - фактор рационального использования углеводородного сырья // Экономический анализ: теория и практика. 2014. №23 (374). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-poputnogo-nefyanogo-gaza-faktor-ratsionalnogo-ispolzovaniya-uglevodorodnogo-syrya> (дата обращения: 21.05.2026).

15. Ваньков А., Нургалиев Р. Схема закачки водогазовой смеси в пласт с утилизацией попутного нефтяного газа // Технологии топливно-энергетического комплекса. – 2007. – № 5. – С. 63–69.