



Научная статья

## Анализ несущей способности фрикционных анкеров в различных горных породах: экспериментальные исследования в регионе добычи серебра Антиатлас Имитер, Марокко

Суфи Амин✉, Уоадиф Латифа, Сусси Мохаммед, Зерради Юсуф, Бахи Анас

Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко

**Как цитировать эту статью:** Суфи Амин, Уоадиф Латифа, Сусси Мохаммед, Зерради Юсуф, Бахи Анас. Анализ несущей способности фрикционных анкеров в различных горных породах: экспериментальные исследования в регионе добычи серебра Антиатлас Имитер, Марокко // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 669-682. EDN VJMYXX

**Аннотация.** Изучены факторы, влияющие на несущую способность фрикционных трубчатых анкеров диаметром 39 мм и длиной 180 см с раздвоенным концом. Проведены исследования зависимости эксплуатационных показателей от устойчивости горных пород по рейтингу RMR, времени после установки, ориентации сланцеватости, шероховатости поверхности и качества установки. Цель исследований заключается в оптимизации конструкции анкеров и внедрении предлагаемых решений для повышения безопасности горных работ. Результаты исследования показывают сильную экспоненциальную зависимость сопротивления выдергиванию от устойчивости пород по рейтингу RMR, в менее нарушенном массиве несущая способность анкеров повышается. Несущая способность значительно повышается спустя время, особенно в массиве пород с рейтингом RMR выше 70. Изменение угла между осью анкера и напластованием горных пород 0-90° усиливает отклик анкера на выдергивание. Уменьшение диаметра шпура под анкер способствует увеличению трения анкера при выдергивании. Оценка эмпирических моделей несущей способности анкера по рейтингу пород по RMR, времени, ориентации напластования, диаметру шпуров, наличию шероховатости и качества установки показала их надежность в предсказании показателей эксплуатации анкеров в натурных условиях при значительном улучшении базовых RMR-методов оценки. По результатам экспериментов определено поведение анкеров при выдергивании в распространённых горных породах. Анализ полученных данных показывает пригодность установленных зависимостей к использованию в реальных условиях, что позволяет оптимизировать технические характеристики анкеров для повышения их несущей способности. Представленные методики должны повысить безопасность, эффективность и рациональные затраты на крепление подземных горных выработок. Исследование демонстрирует эксплуатационные показатели анкерной крепи при взаимодействии с массивом горных пород и позволяет повысить качество крепления подземных горных выработок.

**Ключевые слова:** испытания на выдергивание анкеров; несущая способность анкеров; угол анизотропии; рейтинг RMR; крепление подземных горных выработок

Поступила: 01.06.2023

Принята: 05.03.2024

Онлайн: 23.04.2024

Опубликована: 26.08.2024

**Введение.** Испытания на выдергивание анкеров обычно демонстрируют их несущую способность путем приложения соответствующей силы. Эту силу прикладывают гидродомкратом к анкеру, установленному в массив горной породы, при этом считается растяжение анкера для формирования отчета о нагрузках и смещениях [1].

Объектом данного исследования являются анкеры диаметром 39 мм и длиной 180 см из стали марки «Супраформ» S420MC/EN10149. Такие анкеры широко применяют в научных исследованиях из-за их доступности и эффективности при ведении подземных горных работ. Максимальная несущая способность таких анкеров определяется трением стали о горные породы [2].

Задачей исследования является определение множества факторов, влияющих на несущую способность фрикционных анкеров в слоистом массиве горных пород. С использованием данных о качестве массива пород по рейтингу RMR (Rock mass rating) проведены многочисленные испытания на выдергивание для установления данной зависимости. Результаты экспериментов



показывают значительную корреляцию рейтинга RMR с сопротивлением выдергиванию, что говорит о необходимости учета полученных данных при проектировании и производстве анкеров для крепи [3].

Также исследовано влияние длительности приложения нагрузки к анкеру на его несущую способность. Результаты показывают различную степень улучшения несущей способности анкеров в зависимости от качества массива пород: на 31 % в массиве низкого качества ( $RMR < 40$  %), на 21 % в массиве пород среднего качества ( $RMR 50-70$  %) и на 25 % в массиве пород высокого качества ( $RMR > 70$  %) [4].

Дополнительно исследовано влияние анизотропной слоистости пород на несущую способность анкеров: увеличение углов анизотропии, особенно при перпендикулярном расположении оси анкера по отношению к плоскости слоев, обеспечивает повышение несущей способности. С использованием рейтинга RMR, времени после установки и конфигурации анизотропии математические модели позволяют оценить и спрогнозировать несущую способность анкера. Подобные количественные оценки позволяют надежнее выбирать крепление подземных горных выработок по сравнению с традиционными эмпирическими методами.

**Методология.** Фрикционные анкеры представляют собой пустотелые, тонкостенные металлические профили в форме «С», которые работают по принципу полного контакта с массивом горных пород по всей длине анкера. Таким образом реализуется анкерное крепление, основанное на трении, посредством которого достигается мгновенный эффект от усиления пород кровли горных выработок. Трубчатый фрикционный анкер (ТФА) (рис. 1, а) – это трубчатый анкер из специальной стали, который за несколько секунд устанавливается в шпур меньшего, чем сам анкер, диаметра путем постукивания по анкеру, при этом кривизна шпура не имеет значения. Кривизна шпуров увеличивает трение анкера об стенки шпура по всей длине и радиусу трубки (рис. 1, б), обеспечивая мгновенное крепление.

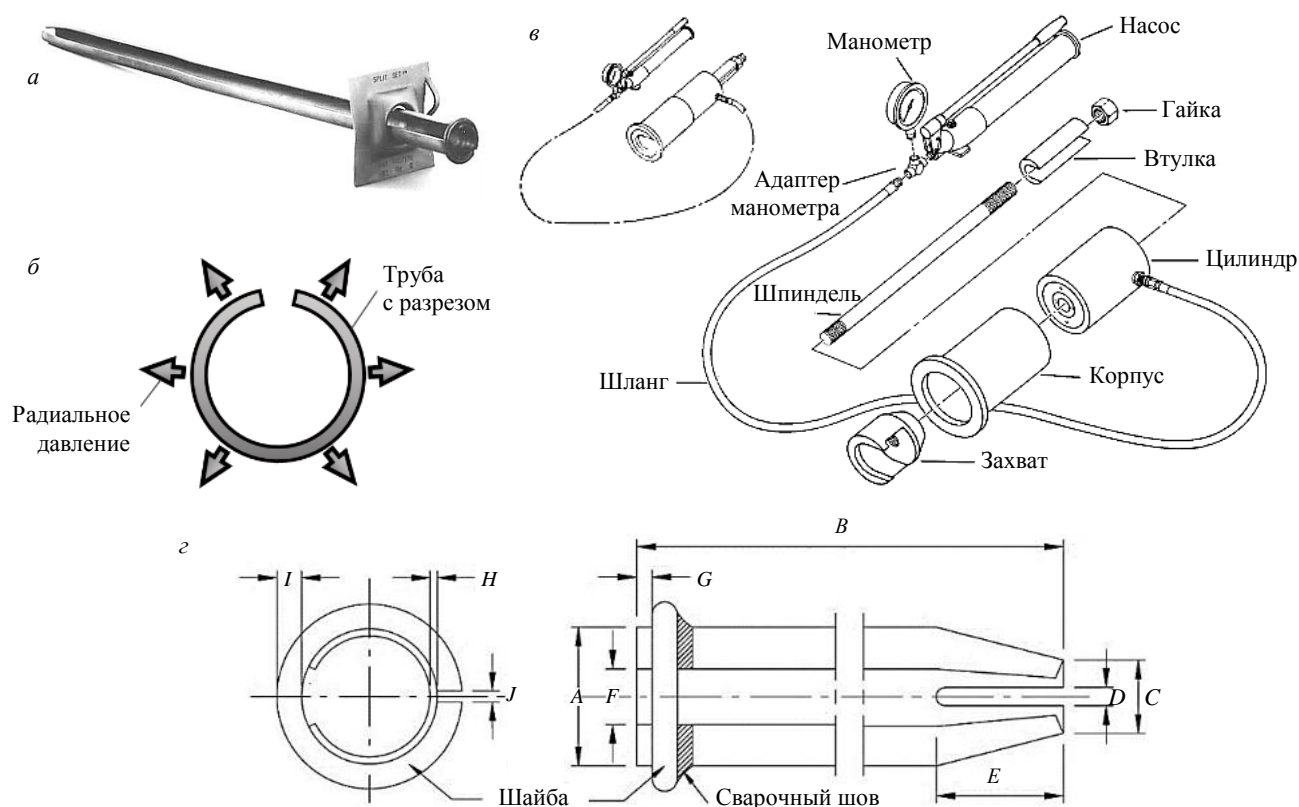


Рис. 1. Фрикционный анкер (ТФА) (а); радиальные нагрузки на анкер (б); прибор для испытания на выдергивание (в); ТФА в разрезе (г)

Диаметр анкера  $A$  39 мм; длина анкера  $B$  1,8 м; внешний диаметр наконечника  $C$  30 мм; внутренний диаметр наконечника  $D$  2 мм; длина наконечника  $E$  65 мм; внутренний диаметр хвостовика  $F$  17 мм; длина хвостовика  $G$  3 мм; толщина профиля анкера  $H$  2/2,5 мм; ширина шайбы  $I$  6 мм; ширина зазора шайбы  $J$  5-6 мм



Испытания на выдергивание – это типовой метод оценки сопротивления ТФА, проводимый для достижения пределов несущей способности анкеров, будь то выskalзывание анкера из шпура или его разрушение [5]. Использование гидродомкрата при испытаниях позволяет приложить к анкеру растягивающую нагрузку, при этом гидродомкрат упирают в борт выработки (рис.1, в). Измерение удлинения анкера с использованием компаратора позволяет прогнозировать характер нагрузок и смещений. В нормальных условиях установки максимум несущей способности ТФА достигается редко. До тех пор, пока диаметр шпура небольшой, трение стали о горные породы обеспечивает принцип работы фрикционного анкера [6].

Для расчета несущей способности анкера максимальные нагрузки при выдергивании отнесены ко всей длине анкера (180 см) в шпуре. Это обычное испытание, и средний вес, выдерживаемый анкером, определяют следующим образом:

$$\sigma_r = \frac{F}{\pi DL \tan \varphi},$$

где  $F$  – сила растяжения, Н;  $D$  – диаметр шпура, м;  $L$  – длина анкера, м;  $\varphi$  – угол трения породы и стали.

Использование в данном исследовании 39-миллиметровых фрикционных анкеров обосновано их широким применением, доступностью, эффективностью, практичностью и адаптацией к уникальным условиям подземных работ [7]. Целью исследования является изучение влияния различных факторов на трение, создаваемое анкерами в массиве горных пород, который характеризуется алевролитовой горной массой со значительной сланцеватостью.

Выбор места проведения испытаний и типа горной породы для исследования направлен на получение значимых и достоверных результатов с учетом различных факторов. Для изучения влияния качества горной массы на несущую способность анкеров выбраны разные горные материалы с различными геомеханическими характеристиками. Это обеспечило тщательное изучение связи между рейтингом пород RMR и сопротивлением выдергиванию. Чтобы представить широкий спектр качества, были отобраны различные типы горных пород с разными прочностью и нарушенностью. Кроме того, были тщательно отобраны однородные и типичные блоки горных пород из выбранного для испытаний массива – образцы с однородными характеристиками в рамках соответствующих категорий горных пород, что, в свою очередь, позволило уменьшить возможные отклонения в результатах испытаний и создать надежный набор данных для оценки связи между индексом RMR и сопротивлением выдергиванию.

В экспериментах стальной штатив сыграл решающую роль при закреплении гидродомкрата. Обеспечивая устойчивую и надежную опору, штатив эффективно закреплял гидродомкрат, предотвращая любые перемещения или отклонения во время приложения осевых нагрузок. Получены точные и последовательные измерения сопротивления выдергиванию, что повысило общую точность и надежность проводимого эксперимента (рис.2).

Важность использования стального штатива обусловлена его способностью сокращать посторонние воздействия, которые могут повлиять на результаты испытаний. Штатив помогает предотвратить возможные ошибки, неточности измерений или опасности, которые могут возникнуть из-за повышенного

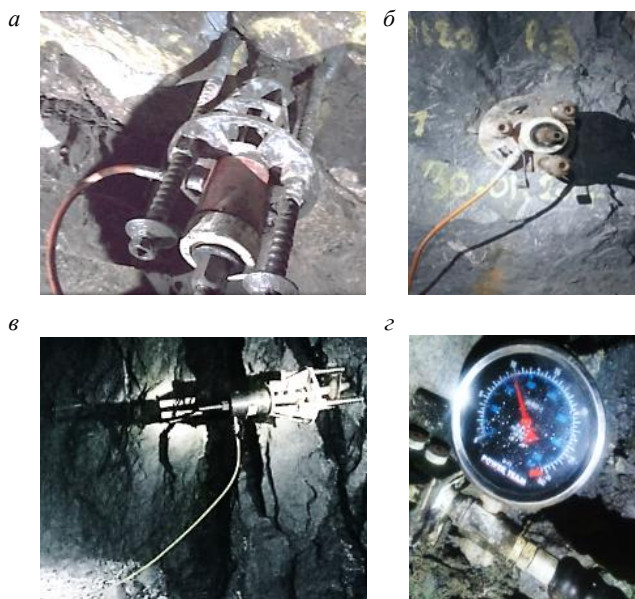


Рис.2. Крепление стального штатива (а); установка гидродомкрата (б, в); начало испытания на выдергивание (г)



давления, неожиданного выброса или неустойчивости, обеспечивая надежное основание для вытягивающего гидродомкрата. Это позволило точно определить сопротивление выдергиванию, а также измерить зависимость между рейтингом RMR и несущей способностью анкеров.

**Обсуждение результатов.** Влияние качества горной породы на несущую способность фрикционных анкеров. Взаимосвязь между рейтингом горной породы (RMR) и сопротивлением выдергиванию раскрывает важную информацию о влиянии качества массива пород на несущую способность анкеров. Рейтинг RMR – это популярная система классификации для определения геомеханических свойств массивов горных пород. Понимание взаимосвязи между RMR и сопротивлением выдергиванию имеет решающее значение для проектирования и установки эффективных анкерных крепей [8-11].

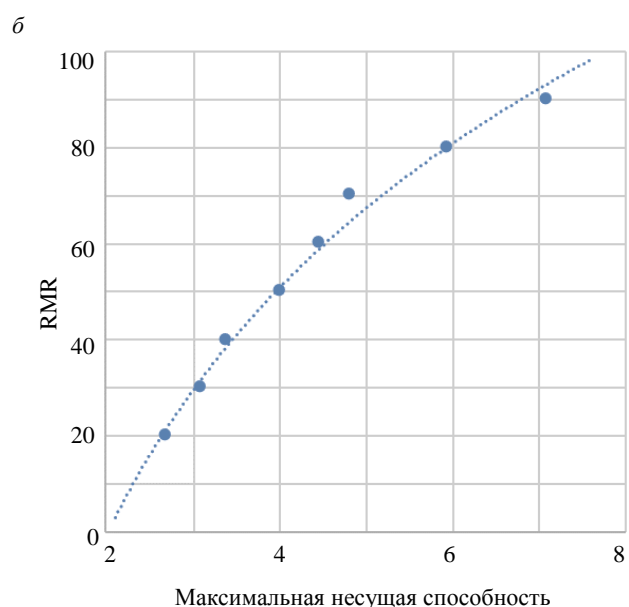
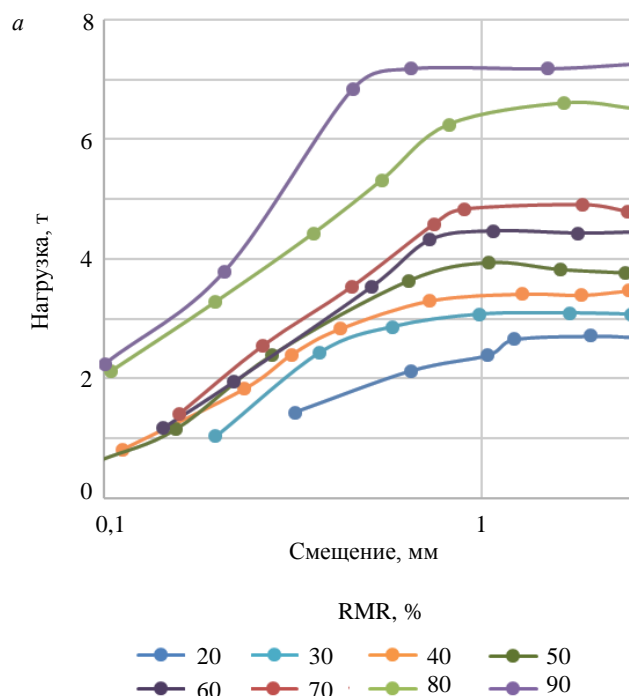


Рис.3. Экспериментальные значения в соответствии с классификацией RMR (а) и график зависимости несущей способности от рейтинга RMR (б)

Рейтинг горной породы, используемый в данном исследовании – это численный метод категоризации, применяемый в геотехнологии и геомеханике для оценки физико-механических свойств массивов. Он учитывает множество параметров, включая качество породы, расстояние между трещинами и их состояние, грунтовые воды и другие геологические свойства, с целью получения количественной оценки пригодности массива для добычи полезных ископаемых. Показатели RMR обычно варьируются от 0 до 100, при этом повышенные значения свидетельствуют о более высоком качестве и устойчивости горной массы [12-14].

В данном исследовании применен комплексный анализ взаимосвязи между рейтингом RMR и сопротивлением выдергиванию. Анкеры устанавливались в горные породы с различными значениями RMR в ходе серии испытаний. Сопротивление выдергиванию анкеров измерялось и сравнивалось с рейтингом RMR пород. Всего для оценки сопротивления выдергиванию с использованием рейтинга RMR было проведено восемь испытаний. Для воспроизведения различных условий выдергивания 39-миллиметровых фрикционных анкеров были пробурены испытательные шпуровые отверстия диаметром 34 мм в породах с различными показателями RMR.

Результаты испытаний на выдергивание отображены на графике зависимости смещения от величины нагрузки (рис.3, а). Для изучения корреляции между сопротивлением выдергиванию и рейтингом RMR линия тренда линейной регрессии добавлена для каждого качества горной массы.

Изменения в рейтинге RMR показали значительную связь с сопротивлением выдергиванию анкеров. Построена кривая несущей способности на основе RMR с использованием предельных точек разрушения для различных





породных массивов (рис.3, б). Данный график на основе рейтинга RMR позволяет определить и предсказать несущую способность анкеров.

Результаты показали сильную связь между рейтингом RMR и сопротивлением выдергиванию. Увеличение значений RMR согласовано с увеличением сопротивления выдергиванию. Это означает, что горные породы с более высокими показателями обладают большей несущей способностью. Горные породы с более низкими значениями RMR, напротив, оказали меньшее сопротивление выдергиванию, что указывает на плохую работу анкеров. Результаты этих испытаний также использовались для определения расстояния между анкерами при установке, основанного на предполагаемой несущей способности в зависимости от RMR, опорного давления Бартон и формулы Чокета и Шарлетта [15, 16].

Зависимость между несущей способностью анкера и рейтингом пород RMR описывается следующей формулой:

$$HC_n = 73,7 \ln(RMR) - 51,2 \text{ при } R^2 = 0,98.$$

На следующем этапе применена  $Q$ -система, разработанная Н.Бартоном, которая широко используется в классификации массивов горных пород в геотехнологии. Она позволяет выполнить количественную оценку качества и поведения массива горных пород, а также оценивать различные геологические и структурные факторы (прочность породы, расстояние между трещинами и их ориентацию, а также состояние грунтовых вод) для присвоения численного значения, называемого  $Q$ -индексом. Индекс  $Q$  служит индикатором качества горной массы, более высокие значения означают наиболее благоприятные условия для подземных горных работ. Инженеры-геотехнологи используют  $Q$ -систему для принятия обоснованных решений относительно опорного давления [17].

Нагрузка на крепь по Н.Бартону:

$$P_{\text{крепь}} = 2Q^{-1/3}/Jr,$$

где  $Jr$  – шероховатость по  $Q$ -системе.

Минимальное расстояние между анкерами по П.Чокет:

$$\text{Расстояние между анкерами} = \sqrt{\frac{10^{-3} HC}{P_{\text{крепь}}}} = \sqrt{\frac{10^{-3} HC Jr}{2Q^{-1/3}}}.$$

По исследованиям 2018 г. [18] по системной корреляции RMR- $Q$ , разработанной в той же зоне ведения горных работ,

$$Q = e^{\frac{RMR - 49,39}{5,614}}.$$

Данное выражение для несущей способности с использованием полученной корреляции системы RMR- $Q$  приняло такой вид:

$$\text{Расстояние между анкерами} = \sqrt{\frac{(73,7 \ln(RMR) - 51,18) Jr \cdot 10^{-3}}{2 \left( e^{\frac{RMR - 49,39}{5,614}} \right)^{1/3}}}.$$

Инженеры и геологи могут принимать обоснованные решения по конструкции болтов, их расположению и расстоянию между ними с использованием этих уравнений и корреляций, что приведет к повышению безопасности и устойчивости крепей подземных горных выработок.

*Влияние времени на несущую способность анкерной крепи в сухом массиве горных пород.* При оценке долгосрочной устойчивости подземных сооружений очень важно учитывать влияние времени на несущую способность анкерной крепи. Это относится к явлениям, при которых несущая способность анкеров может изменяться со временем под воздействием таких факторов как окисление породы, деформация, ослабление крепи. Понимание влияния времени имеет



решающее значение для обеспечения эффективности и долговечности крепления подземных горных выработок во влажном или подверженном другому влиянию массиве горных пород [19-22].

Основное внимание уделяется испытаниям на выдергивание анкерной крепи, установленной в сухих породах. Необходимо охарактеризовать зависящую от времени несущую способность фрикционных анкеров в сухих шпурах. Испытания анкеров, установленных в различное время, позволяют количественно оценить временной прирост характеристик анкерной крепи. Таким образом можно определить растущую зависимость несущей способности болтов с течением времени, известную как коэффициент увеличения прочности в зависимости от времени. Анализ результатов выдергивания во временном периоде установки позволяет калибровать коэффициент усиления для конкретного массива сухих горных пород и типа используемых анкеров. Количественная оценка увеличения прочности анкеров в зависимости от времени в сухих условиях дает представление об одном из ключевых факторов, повышающих показатели анкерной крепи.

В 2016 г. в трех разных типах подземных массивов горных пород с показателем RMR, составляющим 40, 60 и 80 %, был установлен 21 анкер. Для уменьшения влияния анизотропии на несущую способность анкера устанавливались перпендикулярно углу напластования пород. Идентичная технология установки использовалась в 2017 и 2018 годах для измерения влияния времени на несущую способность анкеров после длительного использования.

Через 18 мес. значительного улучшения несущей способности не наблюдалось (рис.4, а). Такое замедление прогресса может быть связано со низкой целостностью массива пород с RMR менее 40 %. В частности, значение несущей способности выросло на 31 % от 3,2 до 4,2 т в конце 18-го месяца. Для класса RMR 40 % и ниже действует следующее уравнение:

$$HC = -0,03t^2 + 0,4t + 2,85 \quad \text{при } R^2 = 0,96,$$

где  $t$  – время, мес.

В диапазоне промежуточного класса, где RMR изменяется от 70 до 50 %, наблюдается постепенное улучшение несущей способности фрикционных анкеров. Через три года значение несущей способности увеличилось от 4,2 до 5,1 т, что составило 21 % (рис.4, б). Эта положительная тенденция может быть объяснена постоянством удержания анкера в шпуре, которое сохраняется после установки анкеров в породы достаточно хорошего качества по RMR. Моделирование этой зависимости:

$$HC = 0,18t + 4 \quad \text{при } R^2 = 0,97.$$

Начиная с 18-го месяца испытаний, значительное улучшение несущей способности было отмечено для классов качества RMR выше 70 %. Значение несущей способности значительно возросло от 5,3 до 6,67 т в конце 36-месячного периода наблюдения, что представляет собой улучшение на 25 % (рис.4, в). Значительное увеличение несущей способности связано с усилением напряжений в высококачественном массиве горных пород. Увеличение напряжений при сжатии

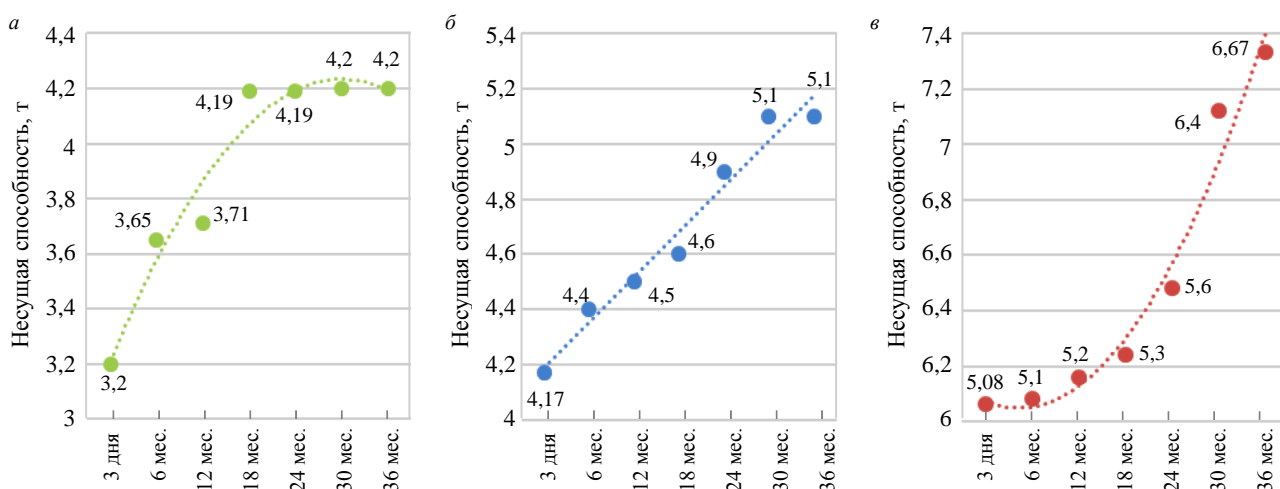


Рис.4. Результаты испытаний в породах с RMR = 40 % (а); RMR = 60 % (б); RMR = 80 % (в)



в этих благоприятных условиях привело к лучшему распределению приложенной к анкеру нагрузки, повысив несущую способность анкерного крепления [23]. Для моделирования этой зависимости рекомендуется использовать представленный полином:

$$HC = 0,08t^2 - 0,35t + 5,4 \quad \text{при } R^2 = 0,96.$$

Результаты этих экспериментов позволили получить важные данные о влиянии времени на несущую способность болтов. Обнаружено, что с течением времени несущая способность анкеров уменьшается. Это может быть связано с деформацией пород, ослаблением анкеров и ползучестью внутри горного массива. Степень снижения зависит от типа пород, вида анкеров и условий установки.

*Оценка несущей способности с учетом RMR и времени.* Изменение несущей способности анкера с течением времени имеет решающее значение для оценки надежности в полевых условиях. С прошествием времени несущая способность установленного анкера снижается из-за коррозии, ослабления на границе анкер – порода и разрушения массива. Для количественной оценки эффекта во времени измерено увеличение сопротивления выдергиванию фрикционных анкеров за 36 мес., которое классифицировано по рейтингу горных пород RMR, всего проведен 21 тест на выдергивание (табл.1).

Таблица 1

**Увеличение несущей способности фрикционных анкеров с течением времени для различных классов RMR**

RMR, %	3 дня	6 мес.	12 мес.	18 мес.	24 мес.	30 мес.	36 мес.
40	0	14	2	13	0	0	0
60	29	38	23	24	17	22	21
80	57	59	42	43	34	53	59

Интерполяционный анализ экспериментальных данных позволил создать трехмерную поверхность, представляющую несущую способность как совместную функцию RMR и времени, прошедшего с момента установки (рис.5, а). Эта визуализация наглядно демонстрирует взаимосвязь качества горных пород и долгосрочных эффектов удерживающего давления на несущую способность анкера.

Для получения эмпирической зависимости замкнутой формы, описывающей взаимосвязь несущей способности анкеров и времени, использован регрессионный анализ (рис.5, б). Для оценки несущей способности с учетом параметров RMR и времени, прошедшего с момента установки, эмпирическая зависимость может быть представлена следующим образом:

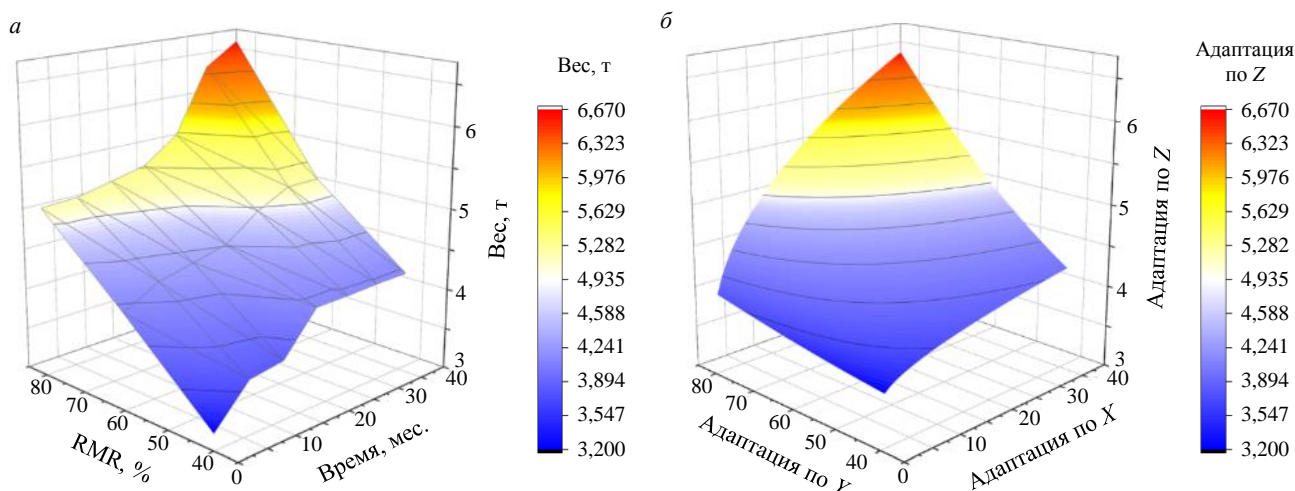


Рис.5. Интерполяция 3D-поверхности по результатам испытаний на выдергивание (а) и 3D-поверхность на адаптивной модели (б)



$$HC(RMR) = 3,5 + \frac{25355}{\left[1 + \frac{RMR}{8,57 \cdot 10^7}\right]^{-0,47} \left[1 + \frac{t}{199,47}\right]^{-2,17}} \quad \text{при } R^2 = 0,92.$$

Поправочный коэффициент, учитывающий прошедшее после установки время,

$$AF_0 = 1 + \frac{HC(RMR)}{HC_n}. \quad (1)$$

Уравнение, основанное на регрессионном анализе, дает возможность на основе исходных характеристик массива пород прогнозировать изменение несущей способности анкеров в зависимости от времени. Рекомендуется провести дальнейшие испытания для проверки модели и уточнения коэффициентов регрессии в более широком диапазоне рейтинга RMR и периодов выдержки.

*Влияние анизотропии на несущую способность анкеров.* Влияние анизотропии, вызванной слоистостью, на несущую способность фрикционных анкеров привлекает внимание исследователей в области геомеханики и геотехнологии. Понимание связи между анизотропией и характеристиками анкерного крепления имеет решающее значение для обеспечения устойчивости крепления и безопасности ведения горных работ [24-27].

Расслоение, сланцевание в массиве горных пород может существенно влиять на общую прочность и механику горных пород. Расслоение – это процесс в массиве пород, в результате которого образуется структура, отличающаяся наличием отдельных параллельных слоев в породе. Этот процесс может привести к образованию слабых плоскостей, вдоль которых горные породы больше склонны к разрушению или деформации при нагрузках. Горные массивы с хорошо развитой слоистостью часто демонстрируют анизотропное поведение, т.е. их прочностные характеристики могут существенно меняться в зависимости от ориентации нагрузки [28, 29].

В данном исследовании процесс выдергивания анкеров начался с ориентации параллельно сланцеванию и перешел в перпендикулярную плоскость. Цель программы испытаний заключалась в определении влияния сланцеватости на несущую способность фрикционных анкеров (рис.6, а). В течение трех дней была проведена серия из 21 испытания на выдергивание предварительно установленных 18 анкеров в горных породах с рейтингом RMR 40, 60 и 80 % для изучения влияния анизотропии, вызванной сланцеватостью, на несущую способность фрикционных анкеров. Угол анизотропии варьировался между шестью различными значениями с шагом 15°. Результаты испытаний показали сильную связь между углом анизотропии и несущей способностью фрикционных болтов в каждой горной породе. Увеличение угла анизотропии связано с увеличением несущей способности болтов (рис.6, б).

График, описывающий несущую способность как функцию RMR и угла анизотропии  $\alpha$ , был создан путем интерполяции между имеющимися точками данных полевых измерений выдергивания (рис.6, в). Это позволило визуализировать совместное влияние этих двух ключевых параметров на несущую способность анкера. Поверхность отклика по грузоподъемности демонстрирует экспоненциальную зависимость как от RMR, так и от угла анизотропии (рис.6, г). Регрессионный анализ был использован для получения эмпирического уравнения в закрытой форме, определяющего несущую способность:

$$HC(RMR, \alpha) = 12,79e^{\left(\frac{RMR}{408,43} + \frac{\alpha}{683,57}\right)} - 12,5 \quad \text{при } R^2 = 0,94.$$

Предложенная экспоненциальная модель обеспечивает функциональную зависимость, которая отражает совместное влияние длины анкера и качества горных пород на эмпирически измеренную способность выдергивания во всем диапазоне тестируемых параметров. С оптимизированным коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,94$  эта экспоненциальная формула позволяет надежно оценить несущую способность анкера как функцию длины анкера и качества горных пород в массиве. Кроме того, предложен поправочный коэффициент анизотропии для количественной оценки влияния угла слоистости  $\theta$  на прогнозируемую несущую способность:



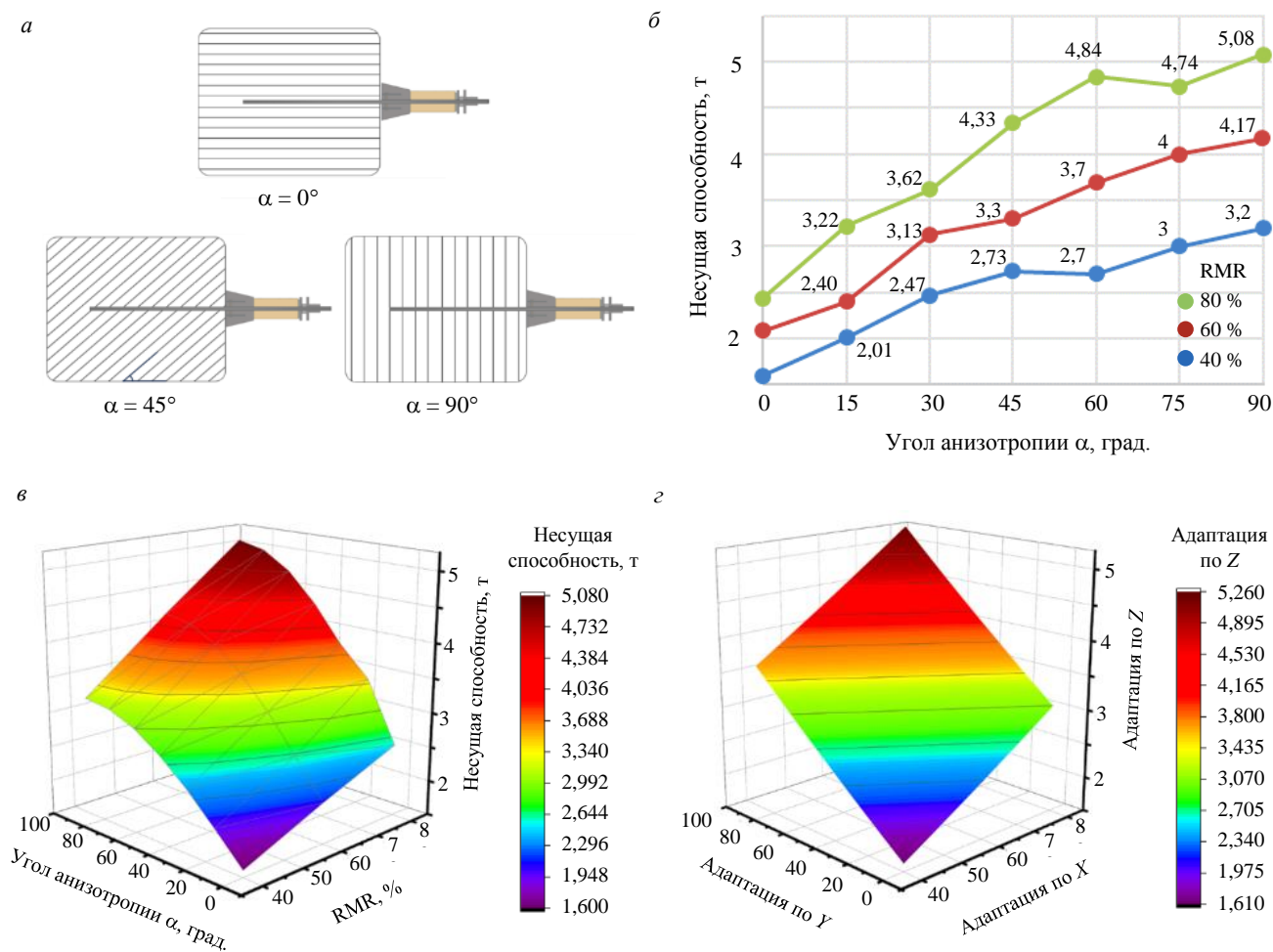


Рис.6. Схема проведения испытаний на выдергивание с разными углами слоистости (а); зависимость несущей способности анкеров от угла анизотропии α (б); трехмерная интерполяция поверхности по точкам измерения выдергивания (в); 3D-поверхность на адаптивной модели (г)

$$AF_1(\theta) = 1 + \frac{HC(RMR, \alpha)}{HC_n}. \quad (2)$$

Полученный поправочный коэффициент изменяется от 0,5 до 1, отражая минимум и максимум анизотропии соответственно. Включение в расчет количественного эффекта от угла сланцевания  $\theta$  позволяет учесть ориентацию в пространстве отдельных слоев в массиве горных пород при оценке несущей способности анкеров. Это повышает надежность и точность оценки. Рекомендуется провести дальнейшие натурные исследования работы наклонного анкера в слоистых горных породах.

**Шероховатость и неровности внутренних стенок шпуров под анкеры.** Второй поправочный коэффициент предлагается использовать в изменении несущей способности анкеров для учета шероховатости внутренних стенок шпуров, буримых под установку анкеров. Эта величина зависит от состояния горных пород и наличия трещин или разрывов внутри шпуров. Для оценки шероховатости можно использовать полевые наблюдения [30, 31].

Предлагается использовать качественный подход, основанный на наблюдении и оценке шероховатости для определения поправочного коэффициента на основе шероховатости стенок шпуров:

$$AF_2 = 1 - (nm), \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости внутренних стенок шпура, от 0 до 1;  $m$  – коэффициент неровности внутренних стенок шпура, от 0 до 1.



Коэффициенты  $n$  и  $m$  представлены в табл.2, основанной на качественном описании шероховатости и неровности стенок шпуров.

Таблица 2

Степень шероховатости и коэффициенты неровности		
Описание шероховатости стенок шпуров	Коэффициенты	
	$n$	$m$
Очень грубые и неровные	0,1	0,5
Очень грубые и неровные	0,2	0,1
Грубые и относительно регулярные	0,3	0,2
Умеренно грубые и регулярные	0,5	0,3
Слегка шероховатые и обычные	0,8	0,6
Очень гладкие и ровные	0,9	0,9

Предложенный эмпирический метод обеспечивает практическую методику оценки шероховатости стенки шпуров и ее влияния на несущую способность анкеров. Специалисты могут легко включить поправочный коэффициент  $AF_2$  в расчеты, используя коэффициенты шероховатости  $n$  и неровности  $m$ , которые могут быть получены путем наблюдения и качественных описаний.

*Коэффициент критериев качества установки крепи.* Влияние качества установки анкера на его несущую способность можно оценить, применив третий поправочный коэффициент  $AF_3$ . Большее значение  $AF_3$  говорит о высоком качестве установки, обеспечивающим лучшее сцепление между сталью анкера и горной породой, что повышает несущую способность [32]. Коэффициент представляет собой совокупную величину, определяемую соблюдением предписанных рекомендаций и служащую критерием качества установки. Выведенный в результате опытного обучения, сотрудничества и консультаций между горными бригадами, ответственными за установку анкерной крепи,  $AF_3$  являет собой оценку качества, предназначенную для наложения штрафов при низком значении коэффициента. И наоборот, когда все предписания по установке крепи выполняются безупречно, коэффициент принимает единичное значение (т.е. равен 1). Для определения этого поправочного коэффициента представлена качественная методика, основанная на полевой оценке многих параметров установки анкерного крепления. Рассчитать коэффициент можно по формуле

$$AF_3 = \sum R_i, \quad (4)$$

где коэффициент критериев качества установки анкеров  $R_i$  складывается из нескольких составляющих: соблюдение рекомендаций по установке  $R_1 - 0,2$ ; использование соответствующих креплений  $R_2 - 0,2$ ; надлежащий контроль качества  $R_3 - 0,1$ ; обучение и компетентность крепильщиков  $R_4 - 0,1$ ; регулярное обслуживание и мониторинг  $R_6 - 0,1$ ; благоприятные условия окружающей среды  $R_7 - 0,1$ ; отсутствие наблюдаемых дефектов или аномалий  $R_8 - 0,2$ .

*Влияние диаметра шпура.* Для обеспечения надежной установки анкеров [33] рекомендуют бурить шпуры меньшего, чем анкер, диаметра. Конструкция ТФА позволяет изменять диаметр наконечника анкера. Прочность соединения зависит от размера наконечника и типа породы. Сопротивление выдергиванию снижается с увеличением размера наконечника. При определении размера наконечника и сопротивления выдергиванию необходимо учитывать тип и качество горных пород [34-36].

Для изучения влияния диаметра шпура на несущую способность фрикционных анкеров относительно диаметра анкера проведена серия из 15 испытаний на выдергивание анкеров, расположенных перпендикулярно к плоскости сланцеватости, чтобы исключить влияние анизотропии. Установленные анкера имели постоянный диаметр 39 мм, для изучения влияния диаметра шпуров рассмотрены тестовые примеры с диаметром шпура от 34 до 38 мм. Количественная оценка влияния разницы диаметров анкеры и пробуренного шпура позволяет понять механизм передачи нагрузки (табл.3). Общая эмпирическая зависимость может быть выведена путем определения процентного соотношения на основе разницы диаметров:



$$K_{рд} = \frac{D_{анк}}{D_{шп}} - 1,$$

где  $D_{анк}$ ,  $D_{шп}$  – диаметры анкера и шпура соответственно.

Таблица 3

Коэффициент разницы диаметров шпура и анкера					
Параметр	Показатель				
Диаметр шпура, мм	34	35	36	37	38
Диаметр анкера, мм	39	39	39	39	39
Коэффициент разницы диаметров $K_{рд}$ , %	14,71	11,43	8,33	5,41	2,63

Это нормализованное соотношение позволяет сравнивать различные диаметры и выявить связь изменений несущей способности (рис.7, а). Оценка отношения для различных диаметров шпура при неизменном диаметре анкера представляет эффект разницы диаметров и позволяет вывести зависимость при взаимодействии анкера со шпуром (рис.7, б).

Диаметр шпура значительно влияет на эффективность работы анкеров в горных породах разного качества. Это позволяет проанализировать роль диаметра шпура в регулировании сопротивления выдергиванию анкеров для различных категорий пород. Чтобы количественно охарактеризовать эту взаимосвязь, можно разработать регрессионную модель, связывающую диаметр шпура с результирующей несущей способностью анкера (рис.7, в):

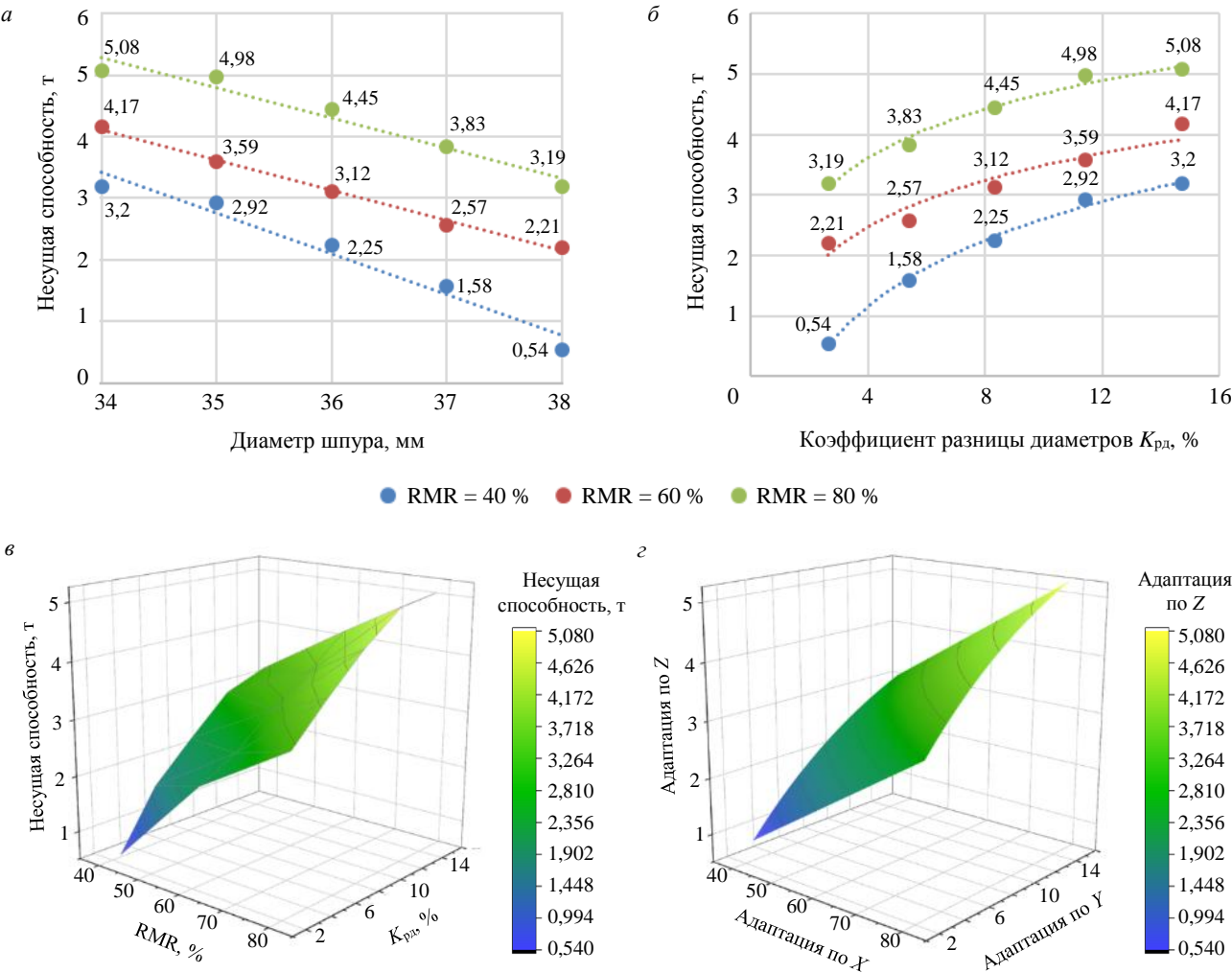


Рис.7. Зависимости несущей способности анкера от диаметра шпура (а) и нормированного коэффициента (б); интерполяция 3D-поверхности по результатам испытаний на выдергивание (в); 3D-поверхность на адаптивной модели (з)



$$HC(RMR, K_{рд}) = -7763,1 + \frac{13138,29}{\left[1 + e^{\frac{-21179 - RMR}{57511,3}}\right] \left[1 + e^{\frac{-89,2 - K_{рд}(\%)}{11,9}}\right]} \quad \text{при } R^2 = 0,98.$$

Поправочный коэффициент отражает зависимость несущей способности анкера от диаметра шпура

$$AF_4 = 1 + \frac{HC(RMR, K_{рд})}{HC_n}. \quad (5)$$

Разработка эмпирической модели позволяет оценить чувствительность несущей способности анкеров к размеру шпура в зависимости от рейтинга горной породы RMR (рис.7, з). Подгонка данных нагрузочных испытаний для различных диаметров шпуров и соотношений массивов горных пород позволяет количественно оценить влияние диаметра шпура для данного класса пород.

**Заключение.** Проведено углубленное исследование ключевых параметров, определяющих несущую способность фрикционных анкеров в подземных горных выработках. С помощью обширной экспериментальной программы, направленной на анализ влияния плотности горной массы, времени, анизотропии, диаметра шпура, шероховатости стенок шпура и качества установки, были разработаны эмпирические зависимости для оценки несущей способности анкеров.

Предложены поправочные коэффициенты для количественной оценки относительного влияния каждой переменной на прогнозы несущей способности анкеров. В формуле объединены параметры улучшения оценки несущей способности фрикционных анкеров:

$$HC = HC_n AF_0 AF_1 AF_2 AF_3 AF_4. \quad (6)$$

Проведенные исследования позволили получить ключевые сведения о поведении фрикционных анкеров:

- RMR экспоненциально коррелирует ( $R^2 = 0,98$ ) с сопротивлением выдергиванию с увеличением на 73,7 % на 10 пунктов RMR;
- зависимое от времени увеличение несущей способности изменяется от 31 % (низкий RMR) до 25 % (высокий RMR) в течение трех лет; полиномиальные модели ( $R^2 = 0,96-0,97$ ) характеризуют это временное усиление;
- увеличение угла сланцеватости от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  повысило несущую способность до 59 %, что отражено в экспоненциальной зависимости ( $R^2 = 0,94$ );
- уменьшение диаметра шпура по отношению к диаметру анкера экспоненциально увеличивает сопротивление трению, при этом уменьшение диаметра шпура на 14,7 % приводит к увеличению несущей способности на 98 %;
- предлагаемые поправочные коэффициенты определяют качество установки (0,5-1), шероховатость поверхности (0,9-1) и влияние времени (1-1,6) на несущую способность.

Предложенное уравнение несущей способности анкеров (6) применимо исключительно к фрикционным анкерам типа ТФА диаметром 39 мм и длиной 180 см. Для обобщения уравнения для всех категорий фрикционных анкеров необходимо провести дополнительные эмпирические исследования с систематическим изменением геометрических размеров (диаметра и длины). Количественная оценка влияния этих модификаций позволит вывести универсальную формулу, которая может стать предметом будущих исследований.

Многомерные регрессионные модели позволяют получить надежные оценки прочности анкеров ( $R^2 = 0,92-0,98$ ) в зависимости от условий на участке ведения горных работ. Это значительный шаг вперед по сравнению с традиционными эмпирическими методами проектирования. Проверка в полевых условиях большего количества геологических условий, типов анкерного крепления и размеров шпуров позволит повысить точность модели. Количественные данные дают важную основу для оптимизации параметров анкерного крепления фрикционными анкерами типа ТФА.





## ЛИТЕРАТУРА

1. Gaudreau D. About the likely performance of ground support systems submitted to dynamic loading / Ground Support 2019: Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 23-25 October 2019, Sudbury, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 213-230. DOI: [10.36487/ACG\\_rep/1925\\_13\\_Gaudreau](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1925_13_Gaudreau)
2. Khaleghparast S., Aziz N., Remennikov A., Anzanpour S. An experimental study on shear behaviour of fully grouted rock bolt under static and dynamic loading conditions // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. Vol. 132. № 104915. DOI: [10.1016/j.tust.2022.104915](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104915)
3. Barnard C., Kallu R.R., Warren S., Thareja R. Inflatable rock bolt bond strength versus rock mass rating (RMR): A comparative analysis of pull-out testing data from underground mines in Nevada // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 1. P. 19-22. DOI: [10.1016/j.ijmst.2015.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.11.004)
4. Dorion J.F. Corroded rock support issues: implementation of an investigation and rehabilitation program / Ground Support 2019: Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 23-25 October 2019, Sudbury, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 401-414. DOI: [10.36487/ACG\\_rep/1925\\_27\\_Dorion](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1925_27_Dorion)
5. Thenevin I., Blanco-Martín L., Hadj-Hassen F. et al. Laboratory pull-out tests on fully grouted rock bolts and cable bolts: Results and lessons learned // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 5. P. 843-855. DOI: [10.1016/j.jrmge.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.005)
6. Tistel J., Grimstad G., Eiksund G. Testing and modeling of cyclically loaded rock anchors // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 1010-1030. DOI: [10.1016/j.jrmge.2017.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.07.005)
7. Lama B., Momayez M. Review of Non-Destructive Methods for Rock Bolts Condition Evaluation // Mining. 2023. Vol. 3. Iss. 1. P. 106-120. DOI: [10.3390/mining3010007](https://doi.org/10.3390/mining3010007)
8. Aydan Ö., Ulusay R., Tokashiki N. A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 47. Iss. 4. P. 1255-1276. DOI: [10.1007/s00603-013-0462-z](https://doi.org/10.1007/s00603-013-0462-z)
9. Komurlu E., Demir S. Length Effect on Load Bearing Capacities of Friction Rock Bolts // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019. Vol. 63. № 3. P. 718-725. DOI: [10.3311/PPci.14081](https://doi.org/10.3311/PPci.14081)
10. Showkati A., Salari-rad H., Aghchai M.H. Predicting long-term stability of tunnels considering rock mass weathering and deterioration of primary support // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 107. № 103670. DOI: [10.1016/J.TUST.2020.103670](https://doi.org/10.1016/J.TUST.2020.103670)
11. Singh M., Viladkar M.N., Shekhawat P.S. et al. Bearing capacity of strip footings on jointed rock mass // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15. Iss. 19. № 1579. DOI: [10.1007/s12517-022-10841-9](https://doi.org/10.1007/s12517-022-10841-9)
12. Maazallahi V., Majdi A. Directional rock mass rating (DRMR) for anisotropic rock mass characterization // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2021. Vol. 80. Iss. 6. P. 4471-4499. DOI: [10.1007/s10064-021-02143-3](https://doi.org/10.1007/s10064-021-02143-3)
13. Димитров И. Структурно-геоложки методи в геотехническата практика – скално рейтингиране. Предимства и проблеми на рейтинговите методи // Списание на Българското геологическо дружество. 2020. Год. 81. Кн. 1. С. 35-54 (на българском). DOI: [10.52215/rev.bgs.2020.81.1.3](https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2020.81.1.3)
14. Peng Wang, Yuan Guo, Guangzhen Cui et al. Cumulative damage and bearing capacity attenuation law of anchorage structure interface under cyclic loading and unloading // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2023. Vol. 9. Iss. 1. № 70. DOI: [10.1007/s40948-023-00612-5](https://doi.org/10.1007/s40948-023-00612-5)
15. Eugie Kabwe, Yiming Wang. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines // Open Journal of Safety Science and Technology. 2015. Vol. 5. № 4. P. 104-121. DOI: [10.4236/ojsst.2015.54013](https://doi.org/10.4236/ojsst.2015.54013)
16. Li C.C. Principles of rockbolting design // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 396-414. DOI: [10.1016/j.jrmge.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.002)
17. Lianyang Zhang. Chapter 5 – Rock Masses // Engineering Properties of Rocks. Butterworth-Heinemann, 2017. P. 137-171. DOI: [10.1016/B978-0-12-802833-9.00005-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802833-9.00005-5)
18. Soufi A., Bahi L., Ouadif L., Kissai J.E. Correlation between Rock mass rating, Q-system and Rock mass index based on field data / 2nd International Congress on Materials & Structural Stability, 22-25 November 2017, Rabat, Morocco. MATEC Web of Conferences, 2018. Vol. 149. № 02030. DOI: [10.1051/mateconf/201814902030](https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902030)
19. Ding Wang, Manchao He, Zhigang Tao. Deformation-softening behaviors of high-strength and high-toughness steels used for rock bolts // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022. Vol. 14. Iss. 6. P. 1872-1884. DOI: [10.1016/j.jrmge.2021.12.026](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.026)
20. Bo Wang, Xinxin Guo, Hui Jin et al. Experimental study on degradation behaviors of rock bolt under the coupled effect of stress and corrosion // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 214. P. 37-48. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.03.335](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.335)
21. Yunpeng Hu, Mingming Zheng, Wenkai Feng et al. Interface bond degradation and damage characteristics of full-length grouted rock bolt in tunnels with high temperature // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 15. Iss. 10. P. 2639-2657. DOI: [10.1016/j.jrmge.2023.04.018](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.018)
22. Shui-Hua Jiang, Dian-Qing Li, Li-Min Zhang, Chuang-Bing Zhou. Time-dependent system reliability of anchored rock slopes considering rock bolt corrosion effect // Engineering Geology. 2014. Vol. 175. P. 1-8. DOI: [10.1016/j.enggeo.2014.03.011](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.011)
23. Skopochka S., Krukovskiy O., Serhiienko V., Krasovskiy I. Physical modeling of the rock bolt interaction with the rock massif / Ukrainian School of Mining Engineering – 2019, 3-7 September 2019, Berdiansk, Ukraine. E3S Web of Conferences, 2019. Vol. 123. № 01002. DOI: [10.1051/e3sconf/201912301002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301002)
24. Soufi A., Bahi L., Ouadif L. Adjusted anisotropic strength model for meta-siltstones and prediction of UCS from indirect tensile tests // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Iss. 7. P. 598-611.
25. Meng-Chia Weng, Jin-Hong Li, Cheng-Han Lin, Chu-Tsen Liao. Measuring Foliation Tensile Strength of Metamorphic Rock by Using Pull-Off Test // Geotechnical Testing Journal. 2018. Vol. 41. Iss. 1. P. 132-140. DOI: [10.1520/GTJ20170078](https://doi.org/10.1520/GTJ20170078)



26. Zhigao Liu, Shoubao Zhang, Weixiang Meng, Zhiliu Wang. Prediction of bolt supporting the controlling influence angle based on a synthetic weight factor // *PloS One*. 2022. Vol. 17. № 10. № e0276536. DOI: [10.1371/journal.pone.0276536](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276536)
27. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. Evaluation of the Load-Bearing Capacity of the Combined Bolt-Welded Joint / *Innovations and Technologies in Construction. Selected Papers of BUILDINTECH BIT 2021*, 9-10 March 2021, Belgorod, Russia. Cham: Springer, 2021. Vol. 151. P. 174-180. DOI: [10.1007/978-3-030-72910-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_25)
28. Vangla P., Wala B.A., Gayathri V.L., Frost J.D. Snakeskin-inspired patterns for frictional anisotropic behaviour of split set rock bolts // *Géotechnique Letters*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 95-100. DOI: [10.1680/jgele.21.00076](https://doi.org/10.1680/jgele.21.00076)
29. Xufeng Liu, Xia-Ting Feng, Yangyi Zhou, Mostafa Sharifzadeh. Influences of foliation orientation and lateral stress difference on the deformation and fracturing of a thin-layered rock around underground excavations: insight from multi-axial loading tests // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. Vol. 81. Iss. 5. № 171. DOI: [10.1007/s10064-022-02648-5](https://doi.org/10.1007/s10064-022-02648-5)
30. Antonova A., Eik M., Puttonen J. Importance of the surface roughness of a steel fibre pulled out from cement paste by slowly increasing load cycles // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 134. № 104799. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2022.104799](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104799)
31. Spyridis P., Dreier J., Mellios N. et al. Multilateral Assessment of Anchorage Bond Characteristics in Steel Fibre Reinforced Concrete // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Iss. 7. № 1411. DOI: [10.3390/polym14071411](https://doi.org/10.3390/polym14071411)
32. Viljoen B.N., Murphy B.A. Ground support installation quality controls and possible pitfalls: a case study from a critical fall of ground contract rehabilitation project / *Ground Support 2019: Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*, 23-25 October 2019, Sudbury, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 581-592. DOI: [10.36487/ACG\\_rep/1925\\_42\\_Viljoen](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1925_42_Viljoen)
33. Nicholson L., Hadjigeorgiou J. Interpreting the results of in situ pull tests on Friction Rock Stabilizers (FRS) // *Mining Technology*. 2018. Vol. 127. Iss. 1. P. 12-25. DOI: [10.1080/14749009.2017.1296669](https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1296669)
34. Kim H., Rehman H., Ali W. et al. Classification of Factors Affecting the Performance of Fully Grouted Rock Bolts with Empirical Classification Systems // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Iss. 22. № 4781. DOI: [10.3390/app9224781](https://doi.org/10.3390/app9224781)
35. Jianhang Chen, Xin Dai, Junwen Zhang. Analytical Studying the Confining Medium Diameter Impact on Load-Carrying Capacity of Rock Bolts // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. № 6680886. DOI: [10.1155/2021/6680886](https://doi.org/10.1155/2021/6680886)
36. Yanchun Yin, Hongjie Zhou, Yubao Zhang et al. Anchorage weakening effect of coal roadway sidewall with different destressing borehole diameters // *Energy Science & Engineering*. 2023. Vol. 11. Iss. 3. P. 1325-1335. DOI: [10.1002/ese3.1394](https://doi.org/10.1002/ese3.1394)

**Авторы:** Суфи Амин, PhD, профессор, [soufi@emi.ac.ma](mailto:soufi@emi.ac.ma), <https://orcid.org/0009-0002-6137-9459> (Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко), Уоадиф Латифа, PhD, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-4613-1124> (Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко), Сусси Мохаммед, PhD, профессор, <https://orcid.org/0009-0008-7706-6055> (Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко), Зерради Юсуф, PhD, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0192-8225> (Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко), Бахи Анас, PhD, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1450-7254> (Университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.