

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.281.74

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ ПРИ РЕОЛОГИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОРОД

В. Н. Захаров, В. А. Трофимов, Ю. А. Филиппов

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: asas_2001@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Представлена геомеханическая модель горной выработки с анкерным креплением. Задача решена с помощью численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Проведен анализ влияния анкерного крепления на устойчивость горной выработки с учетом реологических свойств пород. Показано, что нагружение и функционирование анкеров осуществляется за счет их совместного деформирования с вмещающим массивом горных пород с учетом характера взаимодействия анкера, фиксирующей заливки и собственно массива горных пород. Рассматривается возможный механизм потери несущей способности анкерной крепи, связанный с разрушением материала анкера. Описан алгоритм определения времени, в течение которого анкер будет способен выполнять свои функции, и места его разрушения.

Массив горных пород, реологическое деформирование, анкерное крепление, численное моделирование, напряжение, выработка

DOI: 10.15372/FTPRPI20210601

Обеспечение безопасности ведения горных работ и необходимость сохранения работоспособности выработок в течение заданного срока предусматривает то или иное закрепление их контура от возможного обрушения [1, 2]. Анкеры (анкерные болты, болты) стали неотъемлемой частью современной системы крепления горных пород как вблизи обнажений, так и собственно обнажений в горных выработках благодаря ряду преимуществ, включая универсальность, гибкость применения, эффективность, относительно низкую стоимость и простоту установки [3–5].

Полностью залитые анкеры, закрепленные по всей длине с помощью цементного раствора или затвердевающего пластического материала, представляют собой наиболее часто используемый тип. Гладкий или ребристый стальной стержень вставляется в скважину, а пустое коль-

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-943 и European Commission Research Fund for Coal and Steel (RFCS) funded project “Advanced methane drainage strategy employing underground directional drilling technology for major risk prevention and greenhouse gases emission mitigation” GA: 847338 — DD-MET — RFCS-2018/RFCS-2018”.

цевое пространство, зазор между анкером и стенкой скважины, заполняется цементным или полимерным раствором, который со временем затвердевает. Взаимодействие между породами и болтом происходит непрерывно по всей его длине за счет внутреннего сцепления заполняющего материала, трения на границах раздела анкер–раствор–порода, а также механического зацепления в замковых элементах.

Конструкция анкера, а также выбор его типа, длины, схемы и времени установки определяются характером проекта, методом выемки горной массы (буровзрывные, механические работы) с учетом исходных напряжений и интенсивности трещиноватости массива [6]. В зависимости от предполагаемого механизма разрушения горного массива анкеры могут служить разным целям, например для создания породных балок, предотвращения отслоения отдельных блоков и клиньев, предотвращения горных ударов и создания арок давления. Отметим применение анкеров для уменьшения конвергенции контура выработки в ползучих породах, к которым можно отнести, в частности, соляные породы и уголь. С течением времени эксплуатация многих выработок в таких породах становится невозможной ввиду сокращения их просвета [7].

На сегодняшний день построение анкерной системы в горной выработке остается в основном эмпирическим [8], основанным на классификации горных массивов [9, 10], которое позволяет выработать рекомендации по плотности установки анкеров в зависимости от размера горной выработки и качества вмещающего массива горных пород. Как альтернатива такому подходу развивается количественный анализ, базирующийся на континуальных аналитических решениях или численных моделях, которые могут включать в себя важные структурные особенности массива горных пород (например, деформационные и прочностные неоднородности массива, плоскости напластования, разломы и др.) и более адекватно отображать процессы механического разрушения горных пород [11–21].

Поскольку анкер устанавливается и закрепляется в скважине, пробуренной в массиве, контактные силовые взаимодействия анкера и породы на поверхности скважины, в которую вставляется анкер, всегда разнонаправлены и обеспечивают сдерживание возможных деформаций массива в окрестности выработки, делая анкеры ключевой компонентой в системе крепления. Тем не менее контактные характеристики взаимодействия анкера и массива до сих пор не сформулированы в полной мере, хотя для их определения проводятся многочисленные экспериментальные исследования в лабораторных условиях по вытягиванию установленных анкеров из скважины [12].

В случае натурных исследований *in situ* имеются существенные отличия от экспериментов на вытягивание в лабораторных условиях. Они связаны в первую очередь с наличием в массиве исходных напряжений и специфических условий нагружения анкеров. Ранее выполнялись полевые эксперименты по мониторингу анкеров в экспериментальной выработке Kielder и предлагалась теория нейтральной точки, согласно которой генерируются два сдвиговых напряжения, действующие на анкер в противоположные стороны по обеим сторонам от нейтральной точки [11]. Один сегмент анкера тянет его к границе выработки, в то время как другой — нагружен касательными напряжениями, толкающими анкер вглубь массива.

В дополнение к аналитическому методу ряд численных методов предложен для описания *in situ* поведения анкеров. Некоторые из этих методов внедрены в алгоритмы анализа деформаций для применения в условиях более сложных сценариев [17–20]. Однако сложные взаимодействия между массивом, заполняющим раствором и анкерами часто требуют моделей с многочисленными параметрами и соответствующими определяющими соотношениями, что является неудобным в применении.

В меньшей степени исследования касались определения фактических усилий, которые должны вытягивать этот анкер в конкретных горнотехнических условиях. Отметим, что деформирование анкера и массива взаимосвязаны и взаимообусловлены, следовательно, вытягивающие усилия зависят от характера деформирования массива после установки анкера. При этом в начальный момент анкер полностью разгружен и не подвержен вытягиванию (за исключением сил начальной натяжки анкера гайкой).

Рассмотрим общие концептуальные положения, касающиеся установки анкеров во взаимосвязи с развитием горных работ в массиве. Очевидно, что при проходке выработок массив деформируется. В нем происходит перераспределение исходных напряжений, возникают те или иные взаимные неоднородные смещения частей массива. Эти смещения, как правило, увеличиваются при развитии выработанного пространства. В отдельных частях массива растут градиенты смещений, т. е. деформации. Анкер, являясь частью массива, следует за породами и также деформируется. Если установка проведена сразу же после проходки выработки вблизи от ее забоя, то анкер будет далее деформироваться вместе с породами — вытягиваться, изгибаться — до тех пор, пока в массиве не сформируется окончательное равновесное состояние. Установленные таким образом анкеры всегда нагружены. Предельная степень нагрузки определяется прочностными характеристиками заполняющего раствора, если речь идет о полностью или частично залитых (не по всей длине) анкерах. При больших деформациях раствор может разрушаться на отдельных участках, анкер теряет нагрузку и связь с массивом вплоть до выпадения.

Альтернативный вариант заключается в установке анкера значительно позже момента образования выработки, когда уже в основном произошли деформации, обусловленные приращением выработанного пространства. В этом случае как бы ни был установлен анкер, с заливкой по всей длине либо по ее части, он будет практически полностью разгружен. Исходные напряжения в нем определятся затяжкой гайки. Более существенные напряжения могут возникнуть впоследствии, когда массив по тем или иным причинам придет в движение, приводящее к дополнительным деформациям [21, 22]. Таким образом, нагрузка на анкер формируется изменением напряженно-деформированного состояния массива при развитии горных работ.

Кроме того, многие породы проявляют свойство текучести. Пучение пород может достигать десятков сантиметров, изменяя форму сечения и просвет горной выработки. Использование анкеров для поддержания выработок в текучих породах имеет существенные особенности, связанные с непрерывным деформированием массива горных пород на протяжении месяцев и, возможно, лет, что требует специального исследования.

По мере развития горных работ либо текучести массива анкеры начинают постепенно нагружаться и растягиваться из-за подвижек массива как сплошной среды или из-за расслоения и сдвигания по трещинам. Цель предлагаемой работы — теоретическое описание взаимодействия анкерной крепи и закрепляемого массива горных пород при изменении напряженно-деформированного состояния массива вследствие ползучести горных пород.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка геомеханической задачи о деформировании массива при наличии в нем анкеров должна в полной мере учитывать описанную последовательность действий с анкерами, что может быть реализовано лишь с использованием высокопроизводительного программного обеспечения. Все проведенные расчеты выполнялись в рамках многофункционального конечно-элементного комплекса ANSYS.

Алгоритм состоит в следующем. Будем полагать распределение исходных напряжений в массиве горных пород со средним удельным весом $2.5 \cdot 10^4 \text{Н/м}^3$ гидростатическим

$$\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \sigma_z^0 = 2.5 \cdot 10^4 (z - H), \quad (1)$$

где σ_x^0, σ_y^0 — горизонтальные компоненты, σ_z^0 — вертикальная компонента исходных напряжений на глубине H .

Начало глобальной системы координат $Oxyz$ расположено в центре сечения выработки, оси координат Ox и Oy лежат в горизонтальной плоскости, ось Oz вертикальна. Соответственно, ось Oy направлена вдоль выработки, Ox — перпендикулярно. В силу постановки задачи для условий протяженной выработки, т. е. без учета влияния ее торцов, положение начала координат в направлении оси Oy фактически не имеет значения и привязывается к местоположению анкеров при условии их расположения в одной плоскости, перпендикулярной оси выработки.

Например, для глубины расположения выработки $z = 500$ м от дневной поверхности соответствующее напряжение на уровне выработки равно -12.5 МПа. Поскольку расчетная область имеет ограниченные размеры $\sim 80 \times 80$ м, малые в сравнении с глубиной $z = H = 500$ м, то можно считать, что исходные напряжения в пределах всей расчетной области постоянны -12.5 МПа:

$$\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \sigma_z^0 = 12.5 \text{ МПа}. \quad (2)$$

На рис. 1 показан фрагмент вертикального сечения (при $y=0$) расчетной области с выработкой и отмечены места расположения трех анкеров в кровле выработки ($A1-A2, B1-B2, C1-C2$), которые представляют собой стальные стержни длиной $L=3$ м с круглым сечением радиусом $R=2$ см. Стрелками на рисунке для каждого анкера показаны направления локальных осей координат вдоль анкеров и положение на них начала отсчета ($A1, B1, C1$).

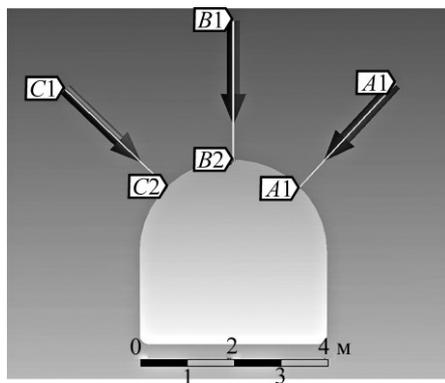


Рис. 1. Фрагмент вертикального сечения расчетной области с анкерами в кровле выработки

Несмотря на сходство с $2D$ -постановкой в рамках плоской деформации, задача ставится в $3D$ -постановке, т. е. расчетная область по координате y (вдоль выработки) имеет фактический размер в 2 м в пределах от $y = -1$ м до $y = +1$ м. При этом на поверхностях $y = \pm 1$ м граничные условия следующие:

$$w_y = 0, \quad (3)$$

где w_y — смещения точек расчетной области по координате y , вдоль оси выработки.

В силу (3) данные плоскости являются плоскостями симметрии по y . Это означает присутствие бесконечного числа анкеров, расположенных в три ряда вдоль выработки с расстояниями между ними на толщину расчетной области — в 2 м. Такого рода постановка задачи позволяет рассмотреть крепление выработок на большей части их протяженности, за исключением конечных частей.

Полная расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед $80 \times 80 \times 2$ м, фактически вертикально расположенную пластину, на трех торцевых поверхностях которой смещения по нормали равны нулю (боковых и верхней), на нижней торцевой поверхности произведено закрепление по всем степеням свободы.

Таким образом, на первом этапе решается задача о распределении напряжений в расчетной области, получившейся в результате образования выработки (еще до установки анкеров). При этом в расчетах применяется унифицированная конечно-элементная сетка, используемая на всех этапах расчета и состоящая из набора тетраэдров, которая разбивает весь массив, включая и сами анкера в кровле выработки.

Расчет идет для однородной области со свойствами пород массива. Фактически анкеров в расчете нет, но для них зарезервированы соответствующие области и сетка, которые будут использованы в дальнейшем при их учете. Практически это достигается тем, что на первом этапе деформационным свойствам анкеров приписываются значения соответствующих параметров для пород. В расчетной области и в конечно-элементной сетке зарезервировано местоположение анкеров, однако они проявятся только после задания для соответствующих элементов деформационных свойств. Используется упругая модель массива, для которой модуль упругости Юнга $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.26$.

Расчеты, выполненные на первом этапе, позволяют найти распределение в расчетной области напряжений, деформаций и смещений, сформировавшихся в массиве в результате проходки выработки. В соответствии с общим алгоритмом решения они используются в качестве начальных условий для решения задачи на втором этапе, когда в проводимые расчеты вводятся непосредственно анкера путем задания их свойств в соответствующих зарезервированных элементах сетки.

В итоге на втором этапе получаем неоднородную по деформационным свойствам область, в которой в качестве начальных условий полагаем смещения везде равными нулю, напряжения во всей расчетной области, кроме зон расположения анкеров, равными вычисленным на первом этапе, а в анкерах — нулю. Задание подобных начальных условий обусловлено тем, что смещения, сформировавшиеся в массиве на первом этапе, никоим образом не могут оказать влияние на деформирование и нагружение анкеров. Следовательно, можно задать новый их отсчет непосредственно на этапе деформирования анкеров. Кроме того, вставленный в шпур и зацементированный анкер в начальный момент не нагружен какими-либо силами. Продольные напряжения в нем равны нулю.

Дальнейшее деформирование массива будем полагать связанным исключительно с ползучестью породы, слагающей массив. Так как анкера тем или иным способом скреплены с массивом, при деформировании последнего будут возникать усилия, передающиеся от него анкерам. Анкера будут постепенно нагружаться и в свою очередь оказывать ответное воздействие на массив, участвуя в его деформировании. Ползучесть породы учитывается в рамках модели ползучести [7], определяемой соотношением между скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ и временем деформирования t :

$$\dot{\epsilon} = -C_3 e^{\frac{C_4}{T}}, \quad (4)$$

где $C_1 - C_4$ — определяемые экспериментально константы, характеризующие деформационные свойства массива; σ — параметр, характеризующий напряженное состояние (скажем, первый инвариант напряжений); T — температура среды. В расчетах принималось: $C_1 = 1.24 \cdot 10^{-13}$, $C_3 = 0.678$, $C_2 = C_4 = 0$, в системе единиц — метр, секунда, Кельвин, Ньютон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим сначала особенности изменения напряженного состояния массива вблизи выработки с течением времени в случае отсутствия анкеров, чтобы в дальнейшем оценить их влияние. Состояние массива будем характеризовать и сравнивать по некоторым выбранным отрезкам прямых, например по линиям расположения анкеров.

На рис. 2 показаны нормальные напряжения в массиве при отсутствии анкеров, но в местах их будущего расположения в начальный момент после создания выработки. Три кривые, соответствующие разным анкерам — A , B и C (рис. 1), в рассматриваемом случае практически совпадают между собой из-за формы кровли выработки. Наблюдается локальная симметрия напряженно-деформированного состояния массива как минимум в некоторой близости от верхней части обнажения.

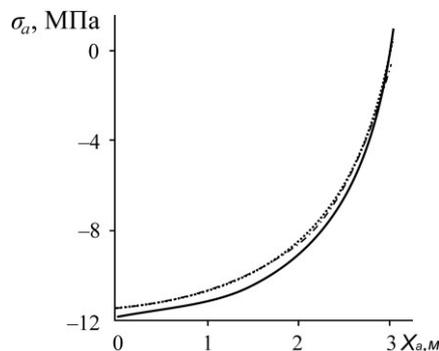


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений сжатия, действующих в массиве вдоль направления анкеров, до их установки

Расчеты аналогичных напряжений, проведенные для периода деформирования массива вблизи выработки до 3 мес, показали, что при заданных параметрах ползучести напряженное состояние устанавливается в начальные моменты деформирования, сразу после образования выработки. В дальнейшем распределение напряжений не изменяется, т. е. течение материала не влияет на распределение напряжений, по крайней мере, вблизи выработки, что и следовало ожидать при реологическом деформировании массива.

Напряжения вокруг выработок сжимающие: на поверхности выработки они равны нулю, на глубине 3 м — ~ 12 МПа, практически совпадая с исходными напряжениями в массиве. Отметим, что показанные напряжения относятся не к глобальной системе координат $0x_{yz}$, а к локальным системам, связанным с направлениями анкеров (x_a — координата вдоль анкера).

Далее рассмотрим деформации и перемещения точек массива за тот же период (рис. 3). В отличие от напряжений, смещения существенно изменяются во времени. Правые концы приведенных кривых при $x_a = 3$ м отражают смещение точки на поверхности выработки ($B2$, рис. 1). При заданных параметрах текучести данные радиальные смещения кровли, фактически совпадающие с полными, практически линейно зависят от времени. Это обусловлено выбранной моделью ползучести (4), в которой убывание скорости ползучести во времени (задаваемое коэффициентом C_3) незначительно.

Параметр, отвечающий за затухание процесса ползучести, достаточно мал для обеспечения выхода на установившийся режим деформирования, о чем свидетельствует практически линейное нарастание по времени смещения кровли в месте расположения среднего анкера со скоростью ~ 4.5 см/мес, определяемой первым параметром C_1 в (4). Кривая 0 показывает смещения

(0.016 м), получаемые при расчете начального состояния массива после образования выработки и до установки анкеров, которые следует вычесть из всех остальных кривых для получения правильных значений смещений, что характерно при решении задачи в дополнительных напряжениях.

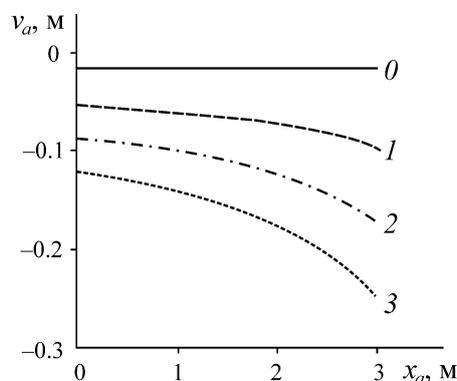


Рис. 3. Радиальные смещения точек массива в месте расположения среднего анкера на разные моменты времени (0 — начальный момент, 1 — 30, 2 — 60, 3 — 90 сут)

Проанализируем степень влияния анкеров на состояние массива вблизи обнажения. Важно отметить, что такое влияние существенным образом зависит от характера взаимодействия анкера и пород массива. Для примера рассмотрим ситуацию, когда анкер закреплен в породе в двух конечных точках и по всей длине. Точки анкера и породы массива, находившиеся в контакте в начальный момент времени, остаются в контакте и далее. В данной ситуации не происходит срыв сцепления по контактам порода – заливка – анкер либо разрушения анкера или самой закрепляемой породы, что подразумевает иную постановку задачи, которая здесь не рассматривается.

При численном моделировании взаимодействие анкера и породы может быть реализовано в рамках различных деформационных моделей как при фрикционном взаимодействии анкера и породы, так и с учетом деформирующейся и разрушающейся заливки. Далее будем полагать, что между анкером и породой имеет место полное сцепление в течение всего времени взаимодействия. Такой подход не позволяет рассмотреть срыв сцепления по контактам, но дает возможность оценить время работоспособности анкера по его прочностным свойствам.

При расчетах считалось, что используются стальные анкеры, для которых модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел прочности на растяжение $\sigma_s \approx 700$ МПа.

Рассмотрим нормальное напряжение на поперечном сечении анкера, действующее вдоль него, и значение которого зависит от положения точки на этом сечении. Далее под продольным напряжением в анкере будем понимать усредненное по сечению нормальное напряжение, действующее вдоль анкера.

На рис. 4 показано распределение продольных напряжений в анкерах через 30 сут после их установки при условии сохранения ими целостности. Три кривые на рисунке соответствуют разным анкерам — А, В и С (рис. 1), которые в рассматриваемом случае практически совпадают между собой, так как форма кровли выработки — круговой цилиндр.

Отметим, что во всех анкерах напряжения положительны, другими словами, находятся в растянутом состоянии. При закреплении анкера по всей длине растягивающие напряжения в нем переменны и в значительной степени концентрируются в половине, примыкающей к поверхности выработки.

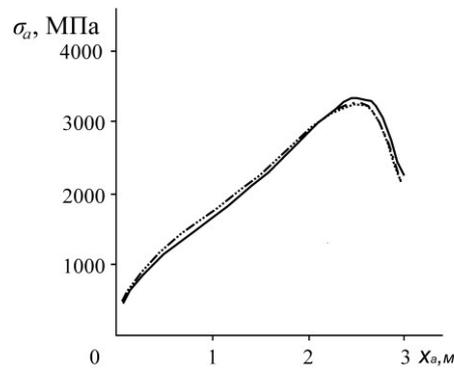


Рис. 4. Распределение продольных напряжений в анкерах через 30 сут после их установки для полного контакта по всей длине, в том числе в конечных точках

На рис. 5 показаны напряжения (речь идет о сроке 30 сут) вдоль отрезков прямых, параллельных анкерам и расположенных в породе в непосредственной близости (2–3 см) к ним. Можно считать, что эти напряжения характеризуют состояние массива, обусловленного суммированием исходных напряжений и напряжений в массиве, формирующихся в результате растяжения анкеров. Концентрации напряжений при $x=0$ и 3 м определены точечным закреплением и имеют локальный характер.

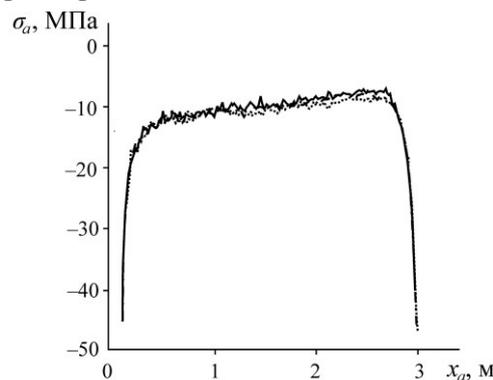


Рис. 5. Напряжения вдоль отрезков прямых, параллельных анкерам и расположенных в породе в непосредственной близости (2–3 см) к ним

На рис. 6 приведено сопоставление распределения напряжений в массиве до установки анкера (рис. 2) и при наличии анкера в непосредственной близости от него (рис. 5) спустя 30 дней деформирования массива.

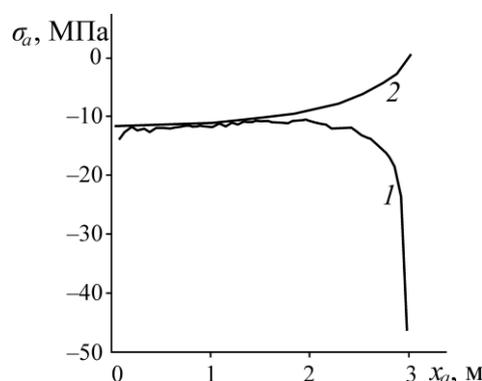


Рис. 6. Распределения напряжений в массиве до установки анкера (2) и при наличии анкера в непосредственной близости от него (1) через 30 дней деформирования массива

Существенные различия начинаются на расстоянии ~ 1 м от поверхности выработки. Они обусловлены тем, что анкер препятствует свободному деформированию массива и частично пригружает его, одновременно растягиваясь. С течением времени породы кровли постепенно деформируются, однако анкеры не способны в полной мере противостоять этому сдвигению, лишь частично его сдерживая.

На рис. 7 показаны распределения продольного напряжения в среднем анкере по его длине в различные моменты времени (0,5, 1 сут, 1, 2, 3 мес) при условии сохранения им целостности. Характерной особенностью этого распределения является наличие максимума, который со временем растет, а точка его локализации постепенно смещается от поверхности выработки вглубь массива.

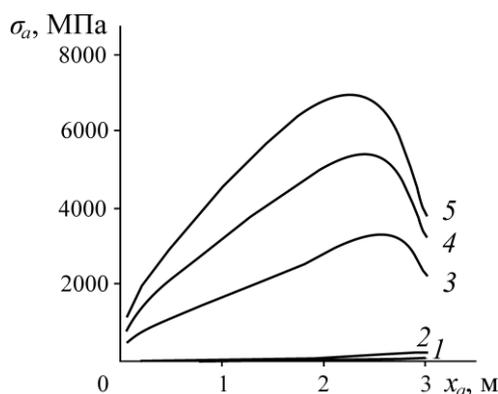


Рис. 7. Распределение продольного напряжения в среднем анкере по его длине на различные моменты времени (1 — 12 ч, 2 — 1 сут, 3 — 1 мес, 4 — 2 мес, 5 — 3 мес) при условии сохранения им целостности

Отметим, что сталь, помимо упругих деформационных свойств, имеет определенные прочностные характеристики. Она, начиная с определенного уровня нагруженности, демонстрирует сначала нелинейные деформационные свойства, затем разрушается. Анкер рвется и полностью теряет свои функциональные свойства. Сопоставляя продольное нормальное напряжение в точке максимума с пределом текучести для стали, можно определить время и место возможного разрушения анкера.

Таким образом, разрушение анкера произойдет в момент времени, когда максимум на соответствующей кривой на рис. 7 станет равным пределу прочности для материала анкера, а место разрушения будет определяться положением этого максимума по длине анкера. Очевидно, что напряжения больше предела прочности материала анкера, получаемые в расчетах, в реальных условиях не могут реализоваться, оставаясь виртуальными. Однако при большей прочности анкера они могли бы воплотиться в жизнь.

Исходя из серии кривых на рис. 7, получена зависимость максимального продольного напряжения в среднем анкере от времени при условии сохранения им целостности (рис. 8). В рассматриваемой постановке предел прочности принят равным 700 МПа. В соответствии с графиком время до разрушения анкера составит ~ 5 сут, при прочности 2000 МПа — ~ 18 сут, а для 4000 МПа — ~ 38 сут. Такое малое время работы анкера обусловлено большим значением параметра C_1 и малым C_3 в соотношении (4), которые были выбраны достаточно произвольно и характеризуют весьма текучий материал.

Силовое взаимодействие анкера и окружающего массива, будь то собственно порода либо материал заливки, осуществляется по поверхности анкера. Введем в рассмотрение касательные напряжения на поверхности анкера в виде усредненных по поверхности локальных касатель-

ных напряжений, действующих в точках поверхности анкера. Используя введенные продольное и касательное напряжения, можно описать равновесие анкера и установить взаимосвязь этих параметров.

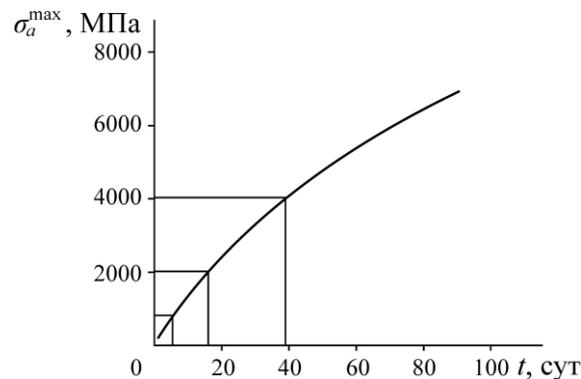


Рис. 8. Зависимость максимального продольного напряжения в среднем анкере от времени при условии сохранения им целостности

На рис. 9 схематически показано распределение напряжений, действующих на часть анкера длиной dx .

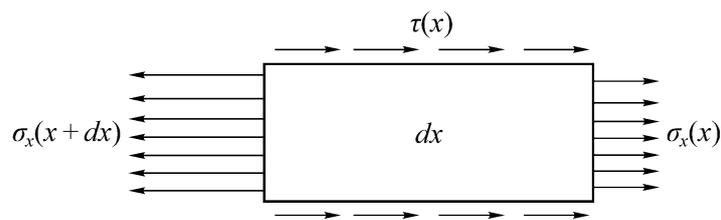


Рис. 9. Схема для вычисления касательных напряжений на поверхности анкера

С учетом приведенного рисунка можно записать следующее соотношение, отражающее равновесие части анкера:

$$\tau(x) = \frac{R}{2} \frac{\partial \sigma_x(x)}{\partial x}. \quad (5)$$

Очевидно, что нормальное напряжение в сечении анкера равно интегралу от касательного напряжения по всей поверхности от начала анкера до этого сечения с учетом граничных условий на его торцах. Продольное напряжение на начальном отрезке интегрирования непрерывно растет, означая, что подинтегральная функция положительна, следовательно, касательное напряжение положительно. После точки максимума продольное напряжение, т. е. интеграл, начинает убывать, что свидетельствует об отрицательных значениях подинтегральной функции — касательное напряжение отрицательно. Таким образом, касательные напряжения изменяют знак по длине анкера, в то время как нормальные — растягивающие. Проведенные расчеты подтверждают описанное в литературе предположение о наличии нейтральной точки в анкере при его деформировании.

Поведение анкера может быть значительно разнообразнее, если принять во внимание возможность разрушения не только анкера, но и других элементов анкерного крепления: самого закрепляемого массива горных пород, заполнителя, контактов массив – заполнитель – анкер.

ВЫВОДЫ

Предпринята попытка построения методического подхода к анализу состояния и поведения анкера в массиве, породы которого проявляют реологические свойства. Очевидным остается тот факт, что при установке анкера в шпур и его фиксации в нем тем или иным способом, этот анкер остается ненагруженным до тех пор, пока в массиве не произойдут те или иные подвижки, как правило, вызванные развитием горных работ, либо связанные с реологическими процессами. Принятие такого положения приводит к необходимости постановки и решения задач о напряженно-деформированном состоянии массива с анкерами в несколько этапов, отражающих технологический процесс установки и эксплуатации анкеров. При этом основная задача ориентирована на оценку сдерживающего влияния анкерной крепи при пучении пород в выработках и в меньшей степени может быть применена при оценке упрочнения, например, трещиноватой среды.

Определяющим моментом построенной модели является реологическое поведение массива горных пород, которое описывается достаточно простой зависимостью скорости деформации от времени и температуры с некоторыми параметрами, определяемыми экспериментально. Вид этой функции позволяет описать широкий спектр реологических свойств массива посредством задания значений эмпирических параметров C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , которые определяют скорость нарастания деформаций, значение предельной деформации, время затухания деформационного процесса вблизи выработки. Подобного рода расчеты поддерживаются комплексом ANSYS, в котором упомянутые параметры задаются в виде свойств среды.

Дальнейшее развитие проведенных исследований связано с детализацией моделей анкерного крепления — учет прочностных характеристик и возможного разрушения материала заливки, пород массива, контактов массив – заливка – анкер. Это позволит выявить наиболее слабое звено в каждой конкретной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bobet A. and Einstein H. H.** Tunnel reinforcement with rockbolts, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2011, Vol. 26. — P. 100–23.
2. **Stillborg B.** Professional users handbook for rock bolting, *Trans tech publications*, 1986. — 164 p.
3. **Vlachopoulos N., Cruz D., Tatone B. S. A., and Lisjak A.** The performance of axially loaded, fully grouted rock bolts based on pull-out experiments utilizing fiber optics technology and associated numerical modelling of such support elements, *Geotech. Geol. Eng.*, 2020, Vol. 38. — P. 1389–1407.
4. **Windsor C. R.** Rock reinforcement systems, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, Vol. 34. — P. 919–951.
5. **Li C.** A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts, *J. Rock Mech. Geotechnical Eng.*, 2014. — P. 315–327.
6. **Hoek E., Kaiser P. K., and Bawden W. F.** Support of underground excavations in hard rock, 1995. — 225 p.
7. **Trofimov V. A. and Filippov Y. A.** Contour convergence regularities for openings in coal, *APM Proceedings*, SPb, Russia, 2020.
8. **Lisjak A., Young-Schultz T., Li B., Liqiang H., Tatone B., and Mahabadi O.** A novel rockbolt formulation for a GPU-accelerated, finite-discrete element method code and its application to underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2020, Vol. 134. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104410.
9. **Bieniawski Z. T.** Engineering classification of jointed rock masses, *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.* 1973, Vol. 15. — P. 335–344.

10. **Barton N. R., Lien R., and Lunde J.** Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mech.*, 1974, Vol. 6. — P. 189–236.
11. **Lisjak A., Tatone B. S. A., Grasselli G., and Vietor T.** Numerical modelling of the anisotropic mechanical behaviour of Opalinus Clay at the laboratory-scale using FEM/DEM, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, Vol. 47. — P. 187–206.
12. **Forbes B., Vlachopoulos N., Diederichs M. S., and Aubertin J.** Augmenting the in-situ rock bolt pull test with distributed optical fiber strain sensing, *Int. J. Rock Mec. Min. Sci.*, 2020, Vol. 126. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104202.
13. **Munjiza A, Owen D. R. J, and Bicanic N.** A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids, *Eng. Comput.*, 1995, Vol. 12. — P. 145–174.
14. **Elmo D., Stead D., Eberhardt E., and Vyazmensky A.** Applications of finite / discrete element modeling to rock engineering problems, *Int. J. Geo. Mech.*, 2013, Vol. 13. — P. 565–580.
15. **Lisjak A., Garitte B., Grasselli G., Müller H. R., and Vietor T.** The excavation of a circular tunnel in a bedded argillaceous rock (Opalinus Clay): short-term rock mass response and FDEM numerical analysis. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2015, Vol. 45. — P. 227–248.
16. **Yan C., Zheng H., Sun G., and Ge X.** Combined finite-discrete element method for simulation of hydraulic fracturing, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, Vol. 49. — P. 1389–1410.
17. **Profit M., Dutko M., Yu J., Cole S., Angus D., and Baird A.** Complementary hydro-mechanical coupled finite/discrete element and microseismic modelling to predict hydraulic fracture propagation in tight shale, *Computational Particle Mech.*, 2016, Vol. 3. — P. 229–248.
18. **Lei Q., Wang X., Xiang J., and Latham J. P.** Polyaxial stress-dependent permeability of a three-dimensional fractured rock layer, *Hydrogeol. J.*, 2017, Vol. 25. — P. 2251–2262.
19. **Vazaios I., Vlachopoulos N., and Diederichs M.** The mechanical analysis and interpretation of the EDZ formation around deep tunnels within massive rockmasses using a hybrid finite-discrete element approach: the case of the AECL URL test tunnel, *Can. Geotech. J.*, 2018. DOI: 10.1139/cgj-2017-0578.
20. **Li X., Kim E., and Walton G.** A study of rock pillar behaviors in laboratory and in-situ scales using combined finite-discrete element method models, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 118. — P. 21–32.
21. **Ali Reza Kargar** An analytical solution for circular tunnels excavated in rock masses exhibiting viscous elastic-plastic behavior, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 124. — P. 104–128.
22. **Sakcalia A. and Yavuz H.** Estimation of radial deformations around circular tunnels in weak rock masses through numerical modelling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 123.

Поступила в редакцию 11/X 2021

После доработки 18/X 2021

Принята к публикации 11/XI 2021