УДК 55.681.3

Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок

С.А.ИГНАТЬЕВ¹, А.Е.СУДАРИКОВ¹, А.Ж.ИМАШЕВ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Карагандинский государственный технический университет, Караганда, Казахстан

Объектом исследования выступают математические методы прогнозирования горного давления для разработки рациональных паспортов крепления горных выработок и безопасного ведения добычных работ. Целью исследований являлась разработка методики использования современных методов вычислений и программных продуктов на основе нейронных сетей для уменьшения разброса факторов, влияющих на устойчивость горных выработок, и определение рациональных параметров крепления горных выработок. В работе рассмотрен алгоритм исследования геомеханических процессов, состоящий из нескольких этапов. На первом этапе предлагается использовать кластерный анализ условий расположения техногенных обнажений, который позволяет разделить все многообразие существующих условий заложения горных выработок. Использование кластерного анализа дает возможность сначала уменьшить разброс факторов, влияющих на устойчивость горных выработок в различных кластерах, а затем разработать и определить рациональные параметры крепления горных выработок в каждом кластере. После решения задачи кластерного анализа предлагается использовать программы, позволяющие на каждом кластере исследовать геомеханические процессы. На этом этапе предлагается применять как стандартные методы (нормативные методики, численное моделирование, использование аналогии и т.д.), так и наиболее современные методы – нейронные сети. Представленный в работе алгоритм решения задач геомеханики с использованием современных численных методов и пакетов прикладных программ на основе нейронных сетей позволит индивидуально подходить к вопросам расчета горного давления при меняющихся условиях расположения техногенных обнажений в горном массиве.

Ключевые слова: геомеханика; горное давление; приконтурный массив; нагружение породы; кластерный анализ; зона неупругих деформаций; нейронные сети

Как цитировать эту статью: Игнатьев С.А. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок / С.А.Игнатьев, А.Е.Судариков, А.Ж.Имашев // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371

Введение. Наличие дополнительного давления горных пород на подземные техногенные обнажения является одной из главных причин несчастных случаев в шахте. Особенности проявления горного давления для своего управления требуют специальных знаний по механике сплошных и сыпучих сред, расчету элементов различных технологий отработки, особым способам и средствам натурных наблюдений, а также правильной интерпретации наблюдений в пространстве и во времени [2].

Постановка проблемы. Возрастание глубины разработки и усложнение горно-геологических и горнотехнических условий требуют более надежных методов прогнозирования горного давления как для разработки рациональных паспортов крепления горных выработок, так и для безопасного ведения добычных работ. Увеличение применения анкерного крепления, по сравнению с рамным креплением, предполагает более точный прогноз геомеханических процессов, происходящих вокруг горных выработок. Существующие нормативные методики прогноза не всегда могут отразить многообразие факторов, оказывающих решающее влияние на проявления горного давления.

Применяемые математические методы моделирования позволяют с большей точностью учитывать многообразие различных факторов, от которых зависят проявления горного давления вокруг выработок [7]. Однако в большинстве случаев данные методы требуют настройки или адаптации программы под конкретные условия горного предприятия что, в свою очередь, усложняет их использование. Применение математических методов также сдерживается из-за существенной неоднородности горного массива на различных локальных участках.

Методология. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) приконтурного массива вокруг полости любой формы не представляет трудности в случае применения специализированных математических программ и современной компьютерной техники. Наибольшую сложность после определения НДС представляет нахождение зоны неупругих деформаций

(ЗНД) или зоны разрушения вокруг полости определенной формы, которая и определяет горное давление. Эта зона служит основанием для разработки параметров крепления горной выработки. Трудность с определением главного фактора разрушения горной породы, несовпадение условий нагружения породы в массиве и при испытании образцов на прочность, масштабный эффект и природное изменение физико-механических свойств на разных участках исследуемого массива иногда сводят на нет сложные математические расчеты НДС массива.

Здесь мы приходим к противоречию: методами сопротивления материалов и строительной механики можно провести точный расчет несущей способности крепи горной выработки только в случае знания величины и характера ее нагружения. Поскольку невозможно точно определить нагрузки на крепи при проявлении горного давления и характер нагружения, нельзя провести точный инженерный расчет горных конструкций, что приводит или к неоправданному завышению коэффициента надежности таких конструкций и перерасходу материалов крепи или к разрушению крепи, зачастую связанную с человеческими жертвами.

В силу неопределенности и невозможности точного определения нагрузок решение задач такого типа не всегда должно начинаться с расчетов на прочность. Первоначально необходимо упорядочить условия заложения горных выработок с использованием математических методов, а затем разрабатывать более конкретные инженерные решения.

Такой подход используется в экономических системах. Турбулентность внешней среды современной мировой экономики не позволяет решать экономические задачи однозначно, как инженерные. Здесь на конечные экономические показатели оказывает влияние слишком большое число факторов. Еще в начале прошлого века математиками были разработаны методы (эконометрический анализ), помогающие определять наиболее существенное влияние внешней среды на тот или иной экономический показатель [8]. Развитие информационных технологий позволило резко упростить многие сложные математические вычисления, что сделало возможным применение математического аппарата широким кругом исследователей.

Использование корреляционно-регрессионного анализа, построение парных и множественных линейных моделей при исследовании геомеханических процессов встречается в большинстве диссертационных работ и научных исследований в горном деле. Применение этих методик всегда ограничено конкретными условиями, для которых проводились исследования, хотя следует отметить, что данные методы позволяют в некоторых случаях использовать простые математические зависимости для моделирования сложных процессов в массиве.

Более сложным и трудоемким можно назвать процесс исследований, применяющий более современные методы вычисления и более современные программные продукты. В этом случае на первом этапе проводится кластерный анализ условий расположения техногенных обнажений, дающий возможность разделить все многообразие существующих условий заложения горных выработок. На втором и последующих этапах предлагается применение программ, позволяющих обнаружить связь между природными факторами и параметрами крепления выработок (такая связь может быть найдена с использованием как самых простых корреляционных моделей, так и современных нейросетей). Предлагаемая методика позволит сначала уменьшить разброс факторов, влияющих на устойчивость горных выработок в различных кластерах, а затем разработать и определить рациональные параметры крепления горных выработок в каждом кластере.

В отличие от задач классификации, кластерный анализ не требует априорных предположений о наборе данных, не накладывает ограничения на представление исследуемых объектов, позволяет анализировать показатели различных типов данных (интервальные данные, частоты, бинарные данные). При этом необходимо помнить, что переменные должны измеряться в сравнимых шкалах.

Кластерный анализ позволяет сократить количество данных для моделирования [5]. Задачи кластерного анализа можно объединить в следующие группы: разработка типологии или классификации; исследование полезных концептуальных схем группирования объектов; представление гипотез на основе исследования данных; проверка предположения, что типы, выявленные различными способами кластерного анализа, должным образом отображены в имеющихся данных. Как правило, при практическом применении кластерного анализа возможно комплексное решение одной или несколько из указанных задач.

Размер кластера может быть определен либо по радиусу кластера, либо по среднеквадратичному отклонению объектов для этого кластера. Объект относится к кластеру, если расстояние от объекта до центра кластера меньше радиуса кластера. Если это условие выполняется для двух и более кластеров, объект является спорным. Неоднозначность данной задачи может быть устранена экспертом или аналитиком.

Кластерный анализ опирается на два основных предположения: 1) выявленные признаки объекта должны допускать разбиение некоторой совокупности объектов на кластеры; 2) правильность выбора должного масштаба или необходимых единиц величин, отражающих признаки объекта (в некоторых случаях требуется применение стандартизованных величин).

После решения задачи кластерного анализа должна быть задействована программа, позволяющая на каждом кластере исследовать геомеханические процессы. В этом случае мы приходим или к стандартным методам, которые используются в горном деле (нормативные методики, численное моделирование, метод аналогии и т.д.), или к наиболее современному методу, получившему в настоящее время большое распространение, – нейронным сетям (НС) [6].

Широкий круг задач, решаемых НС, не позволяет в настоящее время создавать универсальные, мощные сети, вынуждая разрабатывать специализированные НС, функционирующие по различным алгоритмам. Несмотря на существенные различия, отдельные типы НС обладают несколькими общими чертами.

В основе каждой НС лежат достаточно простые и однотипные элементы, имитирующие работу нейронов мозга [1]. Под нейроном подразумевается искусственный нейрон, который и есть ячейка НС. Каждый нейрон как аналог нервных клеток головного мозга, которые могут быть возбуждены, характеризуется своим текущим состоянием. Он обладает группой однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Итак, к общим чертам, присущим всем НС, следует отнести принцип параллельной обработки всех поступающих сигналов, который достигается путем объединения достаточно большого числа нейронов в специфические слои и слияния определенным образом нейронов различных созданных слоев.

Число слоев и нейронов в каждом слое может быть любым, однако по факту оно ограничено техническими возможностями компьютера (память, частота процессора и т.д.). Чем сложнее НС, тем масштабнее задачи, подвластные ей. Современный уровень развития компьютерной техники (мощное оборудование и программная поддержка) позволяет решать достаточно сложные задачи со множеством входящих параметров. Выбор структуры НС осуществляется в соответствии с особенностями и сложностью задачи. Для решения некоторых отдельных типов задач уже существуют оптимальные, на сегодняшний день, конфигурации.

Процесс рациональной работы НС, т.е. действия, которые она способна выполнять, зависит от устойчивости синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой НС, отвечающей какой-либо задаче, ученый должен найти рациональные значения всех переменных весовых коэффициентов (некоторые синаптические связи могут быть постоянными).

Этот важный этап называется первоначальным обучением НС, и от того, насколько правильно он будет выполнен, зависит объективность решения поставленных перед сетью проблем в дальнейших исследованиях. Кроме параметра качества подбора весов важную роль играет необходимое время, выделенное на обучение системы. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью и их приходится выбирать, идя на компромисс и используя опыт исследователя.

Представленный алгоритм решения задач геомеханики с использованием современных численных методов и пакетов специализированных прикладных программ позволит индивидуально подходить к вопросам горного давления при меняющихся условиях расположения техногенных обнажений в массиве и тем самым обеспечит разработку рациональных параметров крепления горных выработок

Обсуждение. В качестве примера сложности определения зоны неупругих деформаций в трещиноватом массиве была выбрана горная выработка арочной формы. Расчет напряжений в окрестности горной выработки был произведен методом граничных интегральных уравнений [3].

Рис.1. Расчетные схемы: а – схема определения лучей на контуре выработки; б – схема луча для сканирования массива

Контролируемые точки располагаются на лучах на равном расстоянии, задаваемом в зависимости от требуемой точности и в соответствии с формой поперечного сечения выработки (рис.1).

Нагружение массива задается напряжением на бесконечности, выраженным в долях γH (где γ – удельный вес пород, H – глубина расположения выработки). Прочностные свойства пород массива задаются по слоям: сцепление – в долях γH , прочность на растяжение – в долях γH , тангенс угла внутреннего трения. При наличии плоскостей ослабления задаются также прочностные свойства на этих плоскостях и угол расположения трещины.

При решении данной задачи в упругой постановке были получены напряжения в окрестности горной выработки, которые определились из исходного напряженного состояния массива, формы и размеров горной выработки.

В дальнейшем была определена условная зона неупругих деформаций вокруг выработки. Под условной зоной неупругих деформаций понимают зону, в пределах которой напряжения, определенные путем решения задачи теории упругости, не удовлетворяют условиям прочности [11, 12]. В качестве перехода приконтурного горного массива в неустойчивое состояние были выбраны два условия: по растягивающим напряжениям и критерию Кулона – Мора. Согласно рассмотренным условиям выработка считается неустойчивой, если хотя бы одно из условий не выполняется.

В качестве базового был рассмотрен пример определения ЗНД при значении параметра $\sigma_p/\gamma H$ равном 0,5 (где σ_p – предел прочности пород на растяжение), что привело к образованию зоны разрушения вокруг моделируемой выработки (0,4-0,8 м). При этом зона разрушения равномерно охватывает контур выработки (рис 2, а).

В качестве второго варианта был рассмотрен тот же массив горных пород с введением трещиноватости согласно исследованиям, проведенным в работах [4, 9, 10] при расстоянии между

Рис.2. Размеры зоны неупругих деформаций

трещинами около 1 м. Прочностные характеристики массива уменьшены в 2 раза без учета направления трещиноватости (рис.2, б). Это привело к образованию более существенной зоны разрушения вокруг моделируемой выработки (1,0-1,3 м), при этом зона разрушения равномерно охватывала контур выработки.

В условия третьего варианта были введены три системы трещин с учетом ослабления прочностных характеристик по направлению трещиноватости (рис.2, в). В этом случае наиболее объективным результатом является упругое решение поставленной задачи в окрестности горной выработки. В дальнейшем, сравнивая результаты, полученные различными методами теории прочности, придем к различным результатам определения ЗНД и нагрузки на крепь выработки. В этом случае можно рекомендовать исследователям указывать, по какому критерию была определена условная зона неупругих деформация и какие особенности данного критерия свойственны именно этому горному предприятию.

Заключение. Решение задач геомеханики по определению устойчивости техногенных обнажений всегда связано с трудностями оценки прочности приконтурных горных пород, а также с возможностью изменения данного параметра в зависимости от природных и техногенных факторов. Все это приводит к значительному увеличению запаса прочности при креплении горных выработок.

Современные численные методы (метод конечных элементов, метод граничных интегральных уравнений) достаточно точно определяют уровень дополнительных напряжений в горном массиве вокруг выработки, но не способны учесть все разнообразие свойств горных пород.

Применение методов кластерного анализа, нейронных сетей совместно с современными численными методами может дать возможность более полно учесть все многообразие горно-геологических и горнотехнических условий в окрестности выработки и тем самым более рационально обеспечивать ее устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков В.П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Пер. с англ. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 392 с.
2. Гальянов А.В. Исторические вехи развития горного искусства // Маркшейдерия и недропользование. 2011. № 1. С. 62-71.
3. Колоколов С.Б. Механизм формирования зон разрушения вокруг подготовительных выработок и их воздействия на поддерживающую крепь: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.07 / Академия наук Респ. Казахстан. Ин-т математики и механики. Алма-Ата, 1992. 35 с.
4. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1979. 304 с.
5. Судариков А.Е. К вопросу о сегментации рынка на базе современных информационных технологий / А.Е.Судариков, В.В.Леонов // Труды Карагандинского университета бизнеса, управления и права. 2004. № 1 (X). С. 93-96.
6. Судариков А.Е. Нейросети – теория сложных систем в экономике // Труды университета. Карагандинский государственный технический ун-т (Караганда). 2008. № 2. С. 69-72.
7. Судариков А.Е. Численное моделирование геомеханических процессов и графические пакеты прикладных программ / А.Е.Судариков, Р.А.Мусин // Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана: Труды Международной научно-практической конференции. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2005. С. 29-31.
8. Судариков А.Е. Эконометрика. Караганда: Карагандинский университет бизнеса, управления и права, 2002. 198 с.
9. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. St. Petersburg, 22 May 2018. Taylor and Francis Group, London, UK. 2018. Vol. 1. P. 3-16.
10. Protosenya A.G. Elastoplastic problem for noncircular openings under Coulomb's criterion / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, N.A.Belyakov // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. Iss. 1. P. 53-61.
11. Protosenia A. Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks / A.Protosenia, M.Karasev, V.Ochkurov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6. № 7(90). P. 11-18.
12. Trushko V.L. Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores / V.L.Trushko, A.G.Protosenya, P.E.Verbilo // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. 13 (8). P. 2864-2872.

Авторы: С.А.Игнатъев, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, Ignatev_SA@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.Е.Судариков, канд. техн. наук, доцент, Sudarikov_AE@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.Ж.Имашев, PhD, заведующий кафедрой (Карагандинский государственный технический университет, Караганда, Казахстан).

Статья поступила в редакцию 17.01.2019.

Статья принята к публикации 26.02.2019.