

~ 100 частиц / (м²·с). Интенсивность потока зависит от давления на уровне наблюдения и высотного профиля температуры. Таким образом, появляется возможность заранее предсказать грозы и магнитные бури по распределению потоков этих частиц. Впервые появилась возможность прогнозировать такое грозное для авиации явление, как турбулентность ясного неба – причину многих авиационных происшествий.

Обратимся к существующей практике и проанализируем качество стандартов. Требуются непрерывные наблюдения и исследования в полетах в реальных условиях. Несмотря на все сложности для сравнения показаний приборов и датчиков, данных летных испытаний и наблюдений, результатов теоретических расчетов, геофизических и метеорологических факторов, необходимо иметь модель атмосферы, которая не зависит от времени суток и года, от места испытаний или полетов. Именно для этих целей разработаны модели стандартной атмосферы. Данные модели не претендуют на универсальность. Известно множество случаев, когда погодные условия делали невозможным не только полет, но даже взлет самолета. При высокой температуре, безветрии и низком давлении тяжелый лайнер не смог взлететь (Англия, 02.08.2018). Простой расчет показывает, что причина в снижении плотности воздуха в сравнении со стандартом. Для давления возьмем $p = 715$ мм рт. ст., $T = 308$ К. В этих условиях плотность воздуха $\rho_0 = 0,891$. Итак, плотность воздуха снизилась на 11 %. Настолько же снизится и подъемная сила. Это изменение – существенная величина, влияющая на экономичность перевозок. Кроме того, следует учесть снижение тяги реактивного двигателя при повышении температуры и снижении давления. Таким образом, самые неблагоприятные условия для взлета – низкое давление и высокая температура. При повышении температуры окружающего воздуха длина разбега самолета увеличивается, а при понижении – уменьшается. Расчетом можно показать, что при повышении температуры на 10 К, что совсем не много, разбег увеличивается на 12–13 %, а при таком же понижении уменьшается на 8–10 % при тех же частотах вращения турбины турбореактивного двигателя. Заранее предсказать такие изменения состояния атмосферы бывает затруднительно. Условия взлета-посадки могут быть скорректированы, чего нельзя сказать об условиях полета на дальние расстояния. Конечно, существуют стандарты на состояние атмосферы в полярную ночь и в полярный день, но обеспечить безопасность полетов на значительные расстояния они не могут.

Существует стандарт МС ИСО 5878 на так называемые справочные атмосферы, которые описывают вертикальное распределение температуры, давления и плотности для пяти географических широт φ : тропическая ($\varphi = 15^\circ$), субтропическая ($\varphi = 30^\circ$), среднеширотная ($\varphi = 45^\circ$), субарктическая ($\varphi = 60^\circ$) и арктическая ($\varphi = 80^\circ$). Итак, стандарты на состояние атмосферы составляются для отдельных регионов и для определенных времен года на основе некоторых средних значений давления, плотности и температуры. Усреднения проводятся в основном по данным наблюдений. Однако условия реальных полетов даже в отмеченных условиях могут значительно отличаться.

Список литературы

- 1 Баранов, А. М. Авиационная метеорология и метеорологическое обеспечение полетов / А. М. Баранов, Г. П. Лещенко, Л. Ю. Белоусова. – М. : Транспорт, 1993.
- 2 ГОСТ 18452–73. Океанология. Уровень моря. Термины и определения. – М. : Госстандарт СССР, 1973. – 5 с.
- 3 ГОСТ 4401–81. Межгосударственный стандарт. Атмосфера стандартная. Госстандарт СССР, 1981. – 17 с.

УДК 539.3+51-74; 622.83

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ГЛУБИНЫ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ДО ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Н. М. КЛИМКОВИЧ, М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ
Белорусский государственный университет, г. Минск

На сегодня определение напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива по всей его высоте, т. е. от глубины ведения горных работ до дневной поверхности, представляет

собой одну из актуальных задач геомеханики. Основным результатом решения подобного класса задач является корректное определение размеров зон вредного влияния горных работ на породный массив по всей его высоте, которые, в свою очередь, используются для определения безопасных расстояний между участками ведения горных работ и геотехническими сооружениями (шахтные стволы, подземные сооружения и наземные объекты и т. д.).

При ведении горных работ с целью обеспечения безопасной эксплуатации подземных и наземных сооружений оставляют нетронутыми некоторые участки массива, называемые охранными целиками. Размеры целиков определяются протяженностью зон вредного влияния горных работ на породный массив, которые вычисляются в соответствии с инженерными методиками. Величина зон вредного влияния горных работ на массив, как показывают результаты натуральных наблюдений, являются значительно завышенными. Во многом это связано с тем, что инженерные методики, применяемые при определении размеров зон вредного влияния горных работ на массив горных пород, не учитывают ряд важных факторов, таких как физико-механические свойства горных пород, особенности изменения горного давления в эффективных слоях породного массива и многие другие.

Таким образом, корректное определение НДС массива горных пород, и, как следствие, более точное определение размеров зон вредного влияния горных работ на породный массив может позволить уменьшить размеры охранных целиков, что предоставит возможность уменьшения количества оставляемых в недрах полезных ископаемых.

В настоящее время, при решении подобного класса задач широко используются различные численные методы и их комбинации. Данные численные методы подразделяются на 2 группы: методы, базируемые на принципах механики сплошных сред (например, метод конечных элементов (МКЭ)) и методы, базируемые на принципах механики дискретных сред (например, метод дискретных элементов (МДЭ) и метод блочных элементов (МБЭ)). Методы из первой группы хорошо подходят для исследования НДС в тех участках породного массива, в которых не наблюдается нарушения сплошности массива [1], из второй группы – для исследования НДС в участках с нарушением сплошности массива [2]. Часто, чтобы нивелировать недостатки каждой из групп численных методов, применяются их комбинации (сопряжения). Среди всех комбинаций при решении данного класса задач наибольшее распространение получило сопряжение МКЭ-МДЭ [3, 4].

Целью представленного исследования являлось компьютерное численное моделирование НДС массива горных пород по всей его высоте при отработке большими площадями. При моделировании, массив горных пород рассматривался в соответствии с упругопластической моделью Кулона – Мора [5]. Полученные результаты верифицировались по данным натуральных наблюдений за оседаниями дневной поверхности над участками ведения очистных работ.

На начальном этапе была разработана геомеханическая модель породного массива, НДС которого определялось на базе МКЭ с введенными упругими блочными элементами. Особенность данного метода заключается в том, что решения для участков породного массива, в которых не наблюдается нарушения сплошности, вычисляется на базе МКЭ, а в зонах нарушения сплошности (зоны трещиноватости и разрушения) – с помощью вводимых упругих блочных элементов. Область формирования блочных структур в массиве горных пород, в свою очередь, определялась по критерию максимальных сжимающих напряжений и критерию пластичности Кулона – Мора.

С помощью данной модификации было получено решение для двумерного упругопластического массива, горные работы в котором велись на трех различных глубинах (600, 800 и 1000 м) [6]. По результатам исследования было получено, что граничные углы в эффективных слоях породного массива, с увеличением глубины ведения горных работ, значительно отличаются от тех, что были рассчитаны согласно инженерной методике. Также было получено, что граничные углы в эффективных слоях изменяются нелинейно и, при увеличении глубины, зона вредного влияния горных работ на породный массив начинает приобретать куполообразную форму.

В дальнейшем решалась задача нахождения НДС трехмерного упругопластического породного массива с шахтным стволом при ведении горных работ в его окрестности [7]. Целью данной задачи является определение влияния горных работ на состояние бетонной крепи шахтного ствола при уменьшении расстояния между ними. По результатам моделирования было получено, что при определенном расположении шахтного ствола в зоне вредного влияния горных работ потери несущей способности бетонной крепи не наблюдается. В соответствии с полученными результатами численного моделирования можно утверждать, что размер зоны вредного влияния горных работ на

массив не является абсолютным показателем при определении размеров охранных целиков между шахтными стволами и участками ведения горных работ на больших глубинах. Данное обстоятельство, в совокупности с полученным ранее результатом, указывающим на то, что зона вредного влияния с увеличением глубины ведения горных работ начинает приобретать куполообразную форму, говорит о потенциальной возможности уменьшения протяженности охранных целиков.

Таким образом, в данном исследовании была разработана механико-математическая модель, позволяющая определять НДС упругопластического породного массива по всей его высоте при ведении горных работ большими площадями. Решения представленных модельных задач были получены с помощью модификации метода конечных элементов путем введения блочных упругих элементов в те участки породного массива, в которых наблюдается нарушение его сплошности. Полученные результаты позволяют корректно определять размеры зон вредного влияния горных работ на породный массив, что, в свою очередь, может быть использовано при уточнении размеров охранных целиков под геотехнические объекты.

Список литературы

- 1 Analysis of the surface subsidence induced by mining near-surface thick lead-zinc deposit based on numerical simulation. Processes / Y. Zhao [et al.]. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–22.
- 2 Numerical simulation of surface subsidence and backfill material movement induced by underground mining / X. Li [et al.] // Advances in Civil Engineering. – 2019. – Vol. 815. – P. 1–17.
- 3 Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element methods / Y. Ju [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 113. – P. 191–210.
- 4 **Гюу W.-В.** Relationship between surface subsidence factor and mining depth of strip pillar mining / W.-В. Gou, Q.-L. Hou, Y.-F. Zou // Transactions of Nonferrous Metal Society of China. – 2011. – Vol. 21. – P. 594–598.
- 5 **Пронкевич, С. А.** Модели грунтов и горных пород при конечно элементном моделировании. Теоретическая и прикладная механика / С. А. Пронкевич, М. Ю. Шпургалова. – 2018. – Вып. 33. – С. 185–192.
- 6 **Журавков, М. А.** Моделирование геомеханического состояния породного массива при отработке подземного пространства большими площадями / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климович // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 4. – С. 97–104.
- 7 **Журавков, М. А.** Модифицированный алгоритм МКЭ с введением блочных упругих элементов моделирования геомеханического состояния подработанного породного массива / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 3–12.

УДК 539.3

НАГРУЖЕНИЕ СЭНДВИЧ-ПЛАСТИНЫ НА ОСНОВАНИИ ПАСТЕРНАКА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. Г. КОЗЕЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время широко применяются в транспортном и строительном комплексах сэндвич-пластины. При их создании сочетают компоненты, обладающие различными физическими и/или химическими свойствами. Это позволяет получать относительно легкие элементы конструкций, детали машин и механизмов, обладающие высокими прочностными и жесткостными характеристиками, а также способные противостоять возникающим при эксплуатации негативным воздействиям.

Несмотря на то, что основы теории расчета многослойных конструкций были заложены ещё в прошлом столетии [1], разработка методов расчета, адекватно описывающих поведение сэндвич-пластин под нагрузкой, и сейчас актуальна. Деформирование упругого трехслойного стержня в температурном поле исследовано в статье [2]. Изгиб упругой кольцевой композитной пластины с легким наполнителем, покоящейся на упругом основании модели Винклера, рассмотрен в работе [3]. Сравнительный анализ моделей Винклера и Пастернака на примере трехслойных круговых пластин показал необходимость применения двухпараметрической модели Пастернака для описания реакции основания [4].