

УДК 622.831

И.А. Ермакова, С.П. Бахаева, А.В. Дягилева

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТВАЛА НА ВОДОНАСЫЩЕННОМ ОСНОВАНИИ

При разработке угольных месторождений открытым способом существует возможность отвалаобразования коренных пород вскрыши на основании, образованном ранее из намывных отложений. Такое технологическое решение позволяет сократить площади земель, отводимых под отвальные сооружения.

Однако, из-за низкой несущей способности не полностью сконсолидировавшихся намывных пород, в этом случае возникает опасность выдавливания слабых пород из-под отвала, что может привести к потерю его устойчивости [1].

Существующие методы расчета устойчивости отвалов базируются на теории сыпучих сред [2], на основе которой разработаны инженерные приемы прогноза устойчивости отвалов, например [3, 4].

В данной работе рассматривается поведение отвала на слабом, глинистом водонасыщенном основании.

В рамках модели линейно-деформируемой среды с помощью метода конечных элементов [5] рассчитываются напряженно-деформированное состояние, а также величины горизонтальных и вертикальных перемещений точек отвала и его основания. Даётся прогноз изменения поля перемещений при дополнительной отсыпке отвала и его устойчивости по критерию прочности сплошных и дискретных горных пород Кулона-Мора.

В работе рассмотрен конкретный пример возведения отвала на гидроотвале № 3 разреза Кедровский.

Поперечное сечение отвала и его основания показано на рис. 1.

1. Слой суглинка 1 полутвердой консистенции, насыщенный водой, мощность которого составляет 1,0–5,6 м, находится на скальном грунте.

2. Намывной грунт (слои 2а и 2б) представляет собой суглинок, образованный при размыве дисперсных вскрышных пород, транспортировка которых в гидроотвал осуществлялась по трубопроводу. Мощность грунта составляет 12,2–40,9 м.

Характеристики намывного грунта:

2а – суглинок мягко- и тугопластичной кон-

систенции, насыщен водой, показатель текучести $I_L=0,40\div0,59$;

2б – суглинок, реже глина, текучей и тугопластичной консистенции, насыщен водой, показатель текучести $I_L=0,72\div1,71$.

3. Насыпной грунт (слой 3) представлен глыбовым и дресвяно-щебенистым грунтом, образован за счет сухой отсыпки вскрышных скальных пород (песчаника, аргиллита и алевролита). Грунт уплотнен с помощью тяжелого автотранспорта. Мощность слоя составляет 11–15 м.

4. Насыпной грунт (слой 4) представлен суглинком дресвянистым, отсыпан сухим способом, залегает локально, достигая глубины 22,5 м.

На площадке гидроотвала обнаружен сформировавшийся техногенный водоносный горизонт, приуроченный к намывным грунтам, кровля которого залегает на глубине 11,0–15,0 м под насыпным грунтом.

Наблюдается самоизлив воды через кромку обсадной трубы у границы слоя 3.

Для расчета напряженно-деформированного состояния отвала и его основания, а также для оценки его устойчивости применялся метод конечных элементов, реализованный в лицензионной программе «Elcut-professional», разработанной производственным объединением ТОР.

Расчетная область задачи совпадает с поперечным сечением отвала (см. рис.1).

Таким образом, рассматриваемый отвал представлен блоком 3, который находится на слабом водонасыщенном основании (гидроотвале), представленном блоками 2а и 2б. Под намывными грунтами 2а и 2б расположен блок 1, нижняя граница которого является основанием скальных пород.

Модули деформации грунтов E были приняты на основании представленных отчетов.

Коэффициент поперечной деформации v выбирался по данным СНиП 2.02.01-83*Основания зданий и сооружений и имеет следующие значения:

- для крупнообломочных грунтов $v=0,27$;
- для песков и супесей $v=0,30\div0,35$;
- для суглинков $v=0,35\div0,37$;

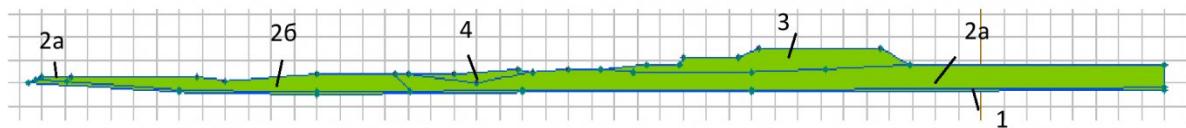


Рис. 1. Поперечное сечение отвала и его основания

Грунт	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент поперечной деформации v	Плотность, г/см ³
1	24	0,35	2,03
2a	10,5	0,45	1,79-1,83
2б	9	0,45	1,83-2,02
3	40 (35-50)	0,27	2,5 (2,2-2,5)
4	10,5	0,3	1,98-2,08

– глина при $0,25 < I_L < 1$ имеет $v = 0,38-0,45$.

Меньшие значения v применяют при большей плотности грунта. [6].

Характеристики грунтов, используемые при расчетах, приведены в таблице.

Критерий прочности Кулона-Мора задавался в форме главных напряжений и пределов прочности в виде [7]:

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cyc}} \cdot \sigma_2 < \sigma_p,$$

где σ_1 и σ_2 – наибольшее и наименьшее главное напряжение; σ_{cyc} , σ_p – пределы прочности пород на сжатие и на растяжение.

Для глины прочностные параметры выражаются через угол внутреннего трения ϕ и сцепление k следующим образом

$$\sigma_{cyc} = 2k \cos \phi / (1 - \sin \phi);$$

$$\sigma_p = 2k \cos \phi / (1 + \sin \phi),$$

где k – коэффициент сцепления; ϕ – угол внутреннего трения.

Отвал нагружен собственным весом, который передается на глинистое водонасыщенное основание и скальное основание. На основание отвала, которое в общем случае не горизонтально, действует подпор воды. Основание массива скальных пород (нижняя граница расчетной области) является жестко защемленным. Каждый структурный элемент расчетной области имеет свои деформационные и прочностные параметры: модули линейной и поперечной деформации и пределы прочности на сжатие и растяжение.

Анализ результатов

1. Распределение горизонтальных перемещений δ_x точек расчетной области показано на рис. 2a). При анализе результатов следует учесть, что ось Ox направлена вправо, поэтому горизонтальные перемещения точек правого крыла расчетной области являются положительными, а левого – отрицательными.

Наибольшие значения горизонтальных перемещений δ_x наблюдаются у границ отвала, в районе точек **B** и **I**. Под этими точками в намывном массиве формируются области наибольших горизонтальных перемещений различных знаков.

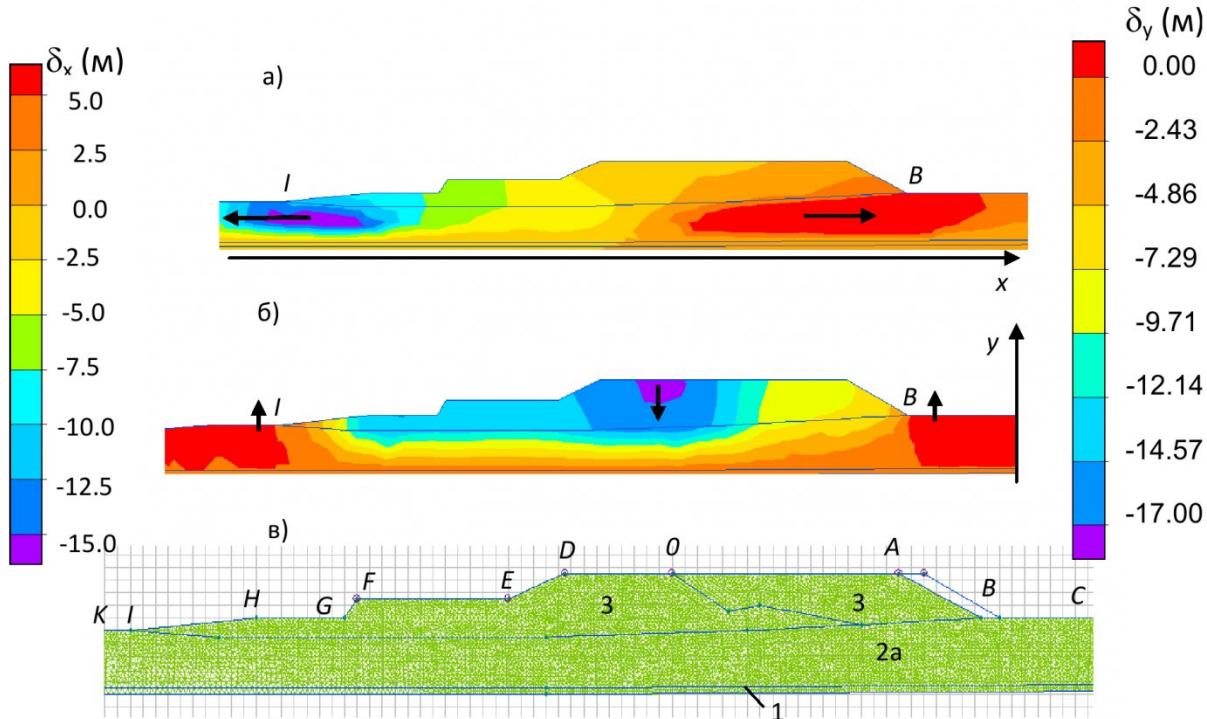


Рис. 2. Распределение горизонтальных δ_x (а) и вертикальных δ_y (б) перемещений; поверхность отвала

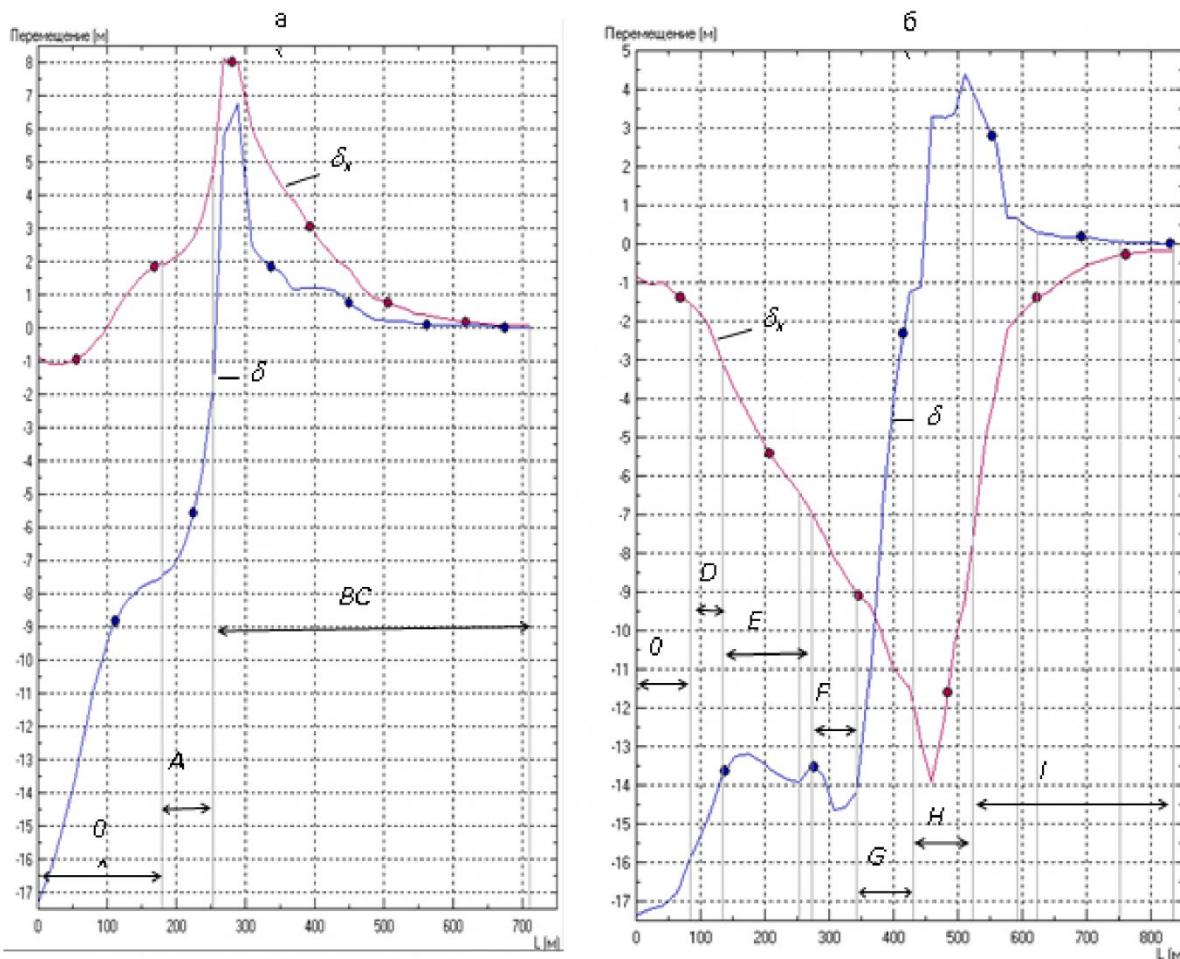


Рис.3. Графики горизонтальных δ_x и вертикальных δ_y перемещений точек на поверхности отвала от т. 0 вправо (а) и влево (б)

Наибольшее значение горизонтальных перемещений δ_x (-13,9 м) на поверхности отвала наблюдаются у его основания в области точки **I**. Непосредственно под этой точкой в намывном массиве локализуется область, в которой горизонтальные перемещения достигают -20,5 м. От этой области вправо происходит уменьшение абсолютных значений горизонтальных перемеще-

ний. Под центром отвала горизонтальные перемещения точек равны нулю. Для точек, лежащих правее этой области, происходит увеличение горизонтальных перемещений, которые достигают наибольшего значения 8,0 м у правого основания отвала, в районе точки **B**. Под этой точкой на глубине 25-30 м расположена область, в которой горизонтальные смещения достигают 13 м.

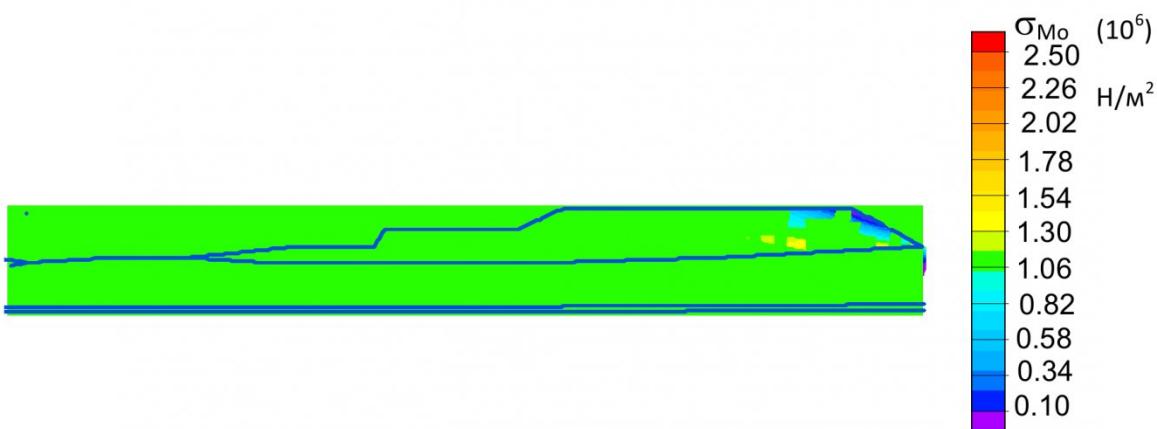


Рис.4. Распределение значений критерия Кулона-Мора

Так как поверхность отвала имеет сложную конфигурацию, то для всех ее угловых точек были введены обозначения (**A**, **B**, **C** и т.д.) (рис. 2 в).

Графики горизонтальных по поверхности отвала от т. **0** вправо и влево показаны на рис. 3а) и 3б) соответственно.

Эти графики позволяют оценить величину горизонтальных перемещений на каждом участке поверхности отвала.

На верхней границе отвала **0A** (см. рис. 3а) горизонтальные перемещения составляют от (-1) до 2 м, на боковой поверхности **AB** – от 2 до 8 м, за пределами отвала, на участке **BC** – плавно уменьшаются до нуля на расстоянии 300÷400 м от его границы.

На верхней границе отвала **0D** (см. рис. 3б) горизонтальные перемещения составляют от (-1) до (-1,5) м.

Далее, на участках **DE**, **EF**, **FG**, **GH** происходит равномерное увеличение горизонтальных перемещений от (-1,5) до (-12) м.

На участке **HI** наблюдается пик горизонтальных перемещений до (-13,9) м.

За пределами отвала, в области намывного массива на участке **IK**, происходит резкое уменьшение горизонтальных перемещений до (-1)÷0 м на расстоянии 100÷200 м от границы отвала.

Таким образом, можно сделать вывод, что под границами отвала сформированы зоны слабых пластичных пород, склонных к перемещению и

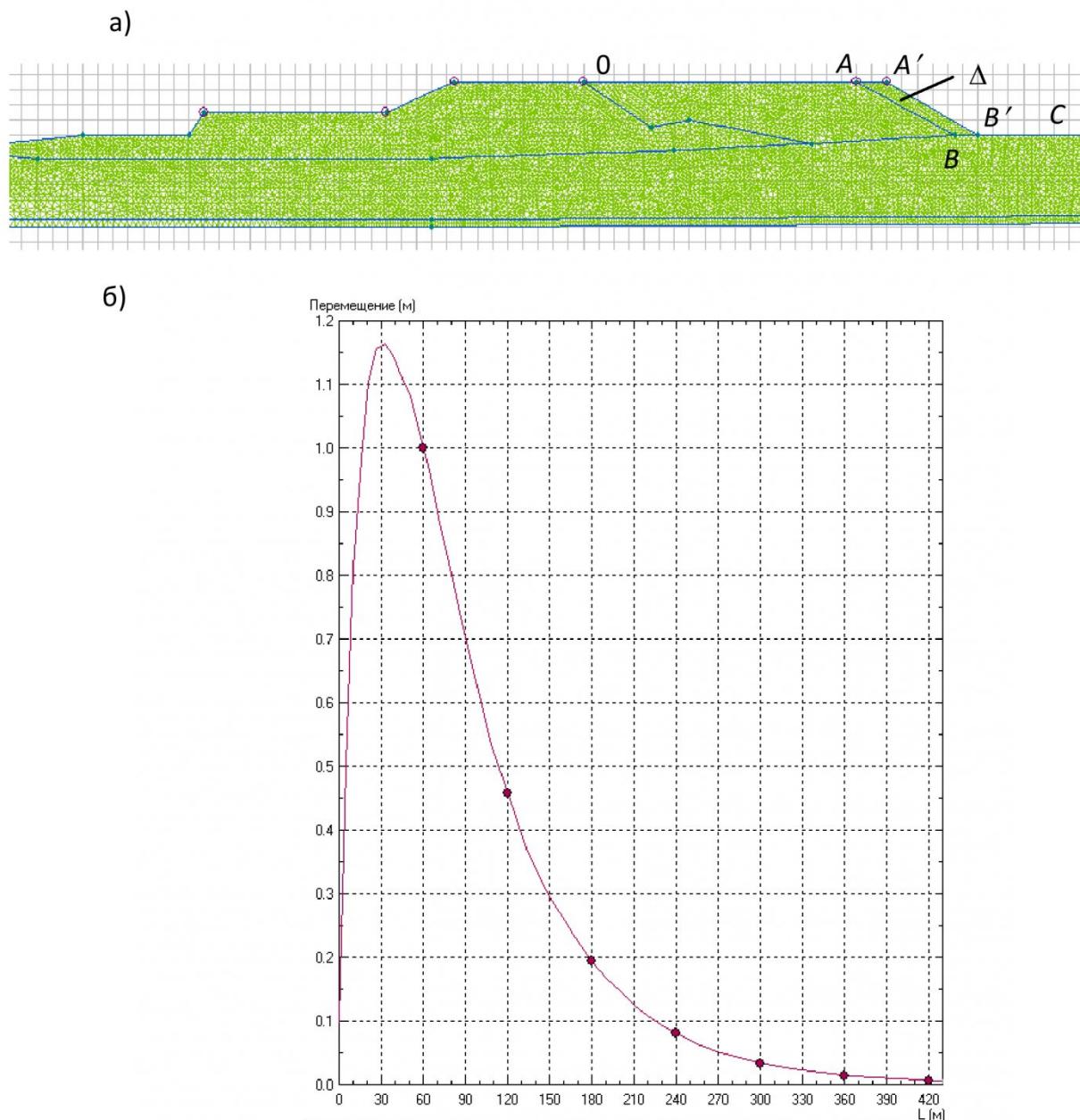


Рис.5. Расчетная область при дальнейшей отсыпке отвала (а) и график дополнительных горизонтальных перемещений точек на поверхности по линии **B'C** (б)

выдавливанию.

Наиболее опасной является левая граница отвала, под которой породы имеют перемещение до 20 м. Полученные при моделировании результаты совпадают с натурными наблюдениями.

В области левой границы отвала было зафиксирован прорыв глинистых пород из-под отвала и их растекание на расстояние до 30 м.

2. *Распределение вертикальных перемещений* δ_y точек расчетной области показано на рис. 2б). При анализе результатов следует учесть, что ось Оу направлена вверх, поэтому вертикальные перемещения вниз имеют отрицательные знаки, а вверх – положительные. Графики вертикальных перемещений δ_y по поверхности отвала от т. 0 вправо и влево показаны на рис. 3а) и 3б) соответственно.

Анализ вертикальных перемещений говорит о том, что дамба, под тяжестью собственного веса, проседает, опускается в слабое водонасыщенное основание, причем наибольшее опускание наблюдается под ее центральной частью.

С уменьшением высоты отвала вертикальные перемещения уменьшаются до нуля, а у основания отвала, в окрестности точек **B** и **I** наблюдаются положительные вертикальные перемещения.

Это связано с выдавливанием слабых глинистых пород из-под отвала и формированием вала выпирания.

3. *Распределение значений критерия прочности Кулонна-Мора* показано на рис. 4.

Наибольшие значения критерия прочности Кулонна-Мора наблюдаются в нижней части отвала, примыкающей к глинистому основанию. В этих областях возможно развитие линий скольжения, что может привести к потере устойчивости отвала.

Анализ данных, полученных при моделировании отвала, позволяет говорить об адекватности модели и выполнить прогноз поведения отвала при его дальнейшей отсыпке.

Прогноз поведения отвала

Согласно плану ведения работ дальнейшая отсыпка отвала предусматривает увеличение ширины отвала в сечении на величину Δ (рис. 5а).

Интерес представляют возможные дополнительные горизонтальные перемещения границы отвала и его основания. На рис. 5б) показаны расчетные горизонтальные перемещения точек на линии **B'C'**.

В результате планируемой отсыпки следует ожидать дополнительного горизонтального перемещения пород отвала на 1,14 м.

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение отвала и повысить безопасность ведения работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жариков В.П. Рациональное землепользование при формировании отвалов и гидроотвалов у разрезах Кузбасса / В.П. Жариков, В.В. Ермошкин, Р.Г. Клейменов. – Вестник КузГТУ. – 2011. - № 1. – С. 34-36.
2. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. - М: Гос. издат. физ-мат. лит., 1960 – 243 с.
3. Крячко, О. Ю; Управление отвалами открытых горных работ / О. Ю, Крячко // - Москва: «Недра», 1980. С.254.
- 4 Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ. / А. М. Гальперин. Москва: Изд. МГГУ, 2003. - С. 473.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
6. http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_Пуассона

Авторы статьи

Ермакова
Инна Алексеевна
докт.техн.наук, проф.
каф. математики КузГТУ,
Email: inna-e@inbox.ru

Бахаева
Светлана Петровна
докт.техн.наук, проф.
каф. маркшейдерского дела и
геодезии КузГТУ,
Email: baxaevas@mail.ru

Дягилева
Анна Владимировна
канд. техн.наук, т.н., доц. каф.
математики КузГТУ
тел. 8-3842-58-46-80;