

DOI 10.15826/rjst.2022.1.002

УДК 69.04

Борисов Н. С.

ООО «Эффективное проектирование», Екатеринбург, Россия

e-mail: nkt.borisov@mail.ru

РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТОВ НА ОГРАЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье приводится сравнительный анализ существующих методов расчета давления грунтов на ограждения. Оценивается эффективность давно существующих аналитических методов расчета и развивающихся в данное время численных методов на основе метода конечных элементов. Приводятся положительные и отрицательные стороны обоих методов, даются рекомендации по их применению. Основное внимание уделено численным методам, приводятся практические примеры расчета давления грунта на ограждающие конструкции. Оценивается влияние различных факторов на результаты численных расчетов, в том числе влияния сцепления грунтов, влияние жесткости грунта и жесткости ограждающей конструкции. Приводится сравнение практического расчета активного и пассивного давлений аналитическим и численным способом и соответствующие выводы. Некоторое внимание уделено скальным грунтам и их взаимодействию и ограждающей конструкцией.

Ключевые слова: Давление грунтов, геотехническое проектирование, метод конечных элементов, подпорные стены, скальные грунты.

Borisov N. S.

LLC «Effect design», Ekaterinburg, Russia

e-mail: nkt.borisov@mail.ru

CALCULATION OF SOIL PRESSURE ON SHORING OF EXCAVATION

Abstract. The article provides a comparative analysis of existing methods for calculating soil pressure on fences. The effectiveness of long-existing analytical calculation methods and currently developing numerical methods based on the finite element method is evaluated. The positive and negative sides of both methods are given, recommendations for their application are given. The main attention is paid to numerical methods, practical examples of calculating ground pressure on enclosing structures are given. The influence of various factors on the results of numerical calculations is estimated, including the influence of soil cohesion, the influence of soil stiffness and the rigidity of the enclosing structure. A comparison of the practical calculation of active and passive pressures by analytical and numerical methods and the corresponding conclusions are presented. Some attention is paid to rocky soils and their interaction with the enclosing structure.

Keywords: soil pressure, geotechnics, finite element method, retaining walls, rocky soils.

1. Введение

Простейшие аналитические методы расчета давления грунтов на ограждения основываются на теории

предельного равновесия (или предельного напряженного состояния). Данная теория предполагает переход всей рассматриваемой зоны грунта

(призмы обрушения) в предельное напряженное состояние. Это позволяет применять к элементам этой зоны уравнение предельного равновесия, известное как закон Кулона:

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma * \tan(\varphi) + c.$$

Также, вводится гипотеза о прямолинейности поверхностей скольжения, что значительно упрощает расчёты. Для расчета давления принимается, что грунт находится в активном предельном состоянии (вертикальное напряжение превышает горизонтальное), для реализации которого необходимо некоторое смещение ограждения по направлению давления грунта, которое обычно происходит вследствие конечной жесткости ограждающих конструкций и податливости грунта. Аналитический расчет подробно описан в работах [1-9].

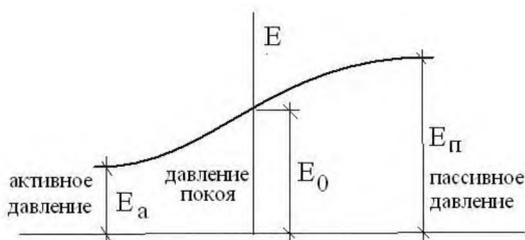


Рис. 1. График зависимости давления от смещения стенки

Активное давление – наименьшее возможное давление, пассивное – наибольшее. Активное давление реализуется при движении стенки от грунта (типичные подпорные стены), а пассивное – при движении сооружения на грунт (устой мостов при наличии распора). Аналитический подход применим в некоторых случаях и оправдывается опытом, но на данном этапе развития геотехники существуют новые более качественные методы оценки давления грунтов на ограждения, оценки устойчивости сооружений и возникающих в элементах сооружений усилий. Эти методы основываются на применении метода конечных элементов и способны

учесть намного большее количество факторов, влияющих на основные результаты расчетов [10-15]. И в конечном итоге избежать аварийных ситуаций [16, 17].

2. Расчеты давления аналитическим и численным способами

Рассмотрим схему ограждения котлована консольного типа.

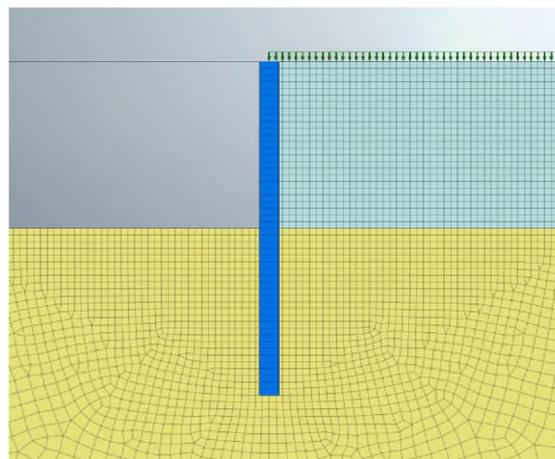


Рис. 2. Расчетная схема для численного расчета

Определим давление на ограждение численным методом в ПК Midas GTS NX и аналитическим методом.

Используем следующие характеристики грунта: $\varphi = 20^\circ$, $c = 10$ кПа, $\gamma = 18 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$

Коэффициент активного давления с учетом трения грунта о стенку (угол трения грунта о стенку $\varphi_0 = 6,66^\circ$) составил $\lambda = 0,458$. Данное значение использовалось в качестве коэффициента бокового давления при численном расчете: $K_0 = \lambda = 0,458$.

Модель грунта – упругопластическая Modified Mohr-Coulomb.

Трение на контактной поверхности в численной модели учитывалось с помощью введения интерфейсов между грунтом и ограждающей конструкцией. Сцепление интерфейсных элементов принималось равным нулю, чтобы грунт не мог «прилипнуть» к ограждению.

Проанализируем результаты расчета (рис. 3 и 4). Наличие горизонтальных смещений даёт основание полагать, что реализуется активное давление грунта. Красным цветом показаны зоны

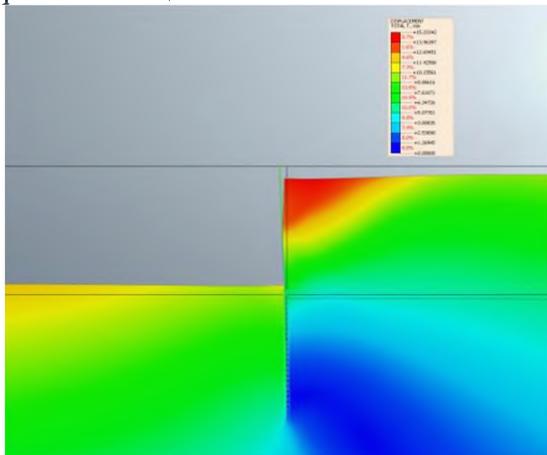


Рис. 3. Изополя общих перемещений

предельного равновесия (пластические точки). Их распространение также говорит о переходе грунта в активное напряженное состояние.

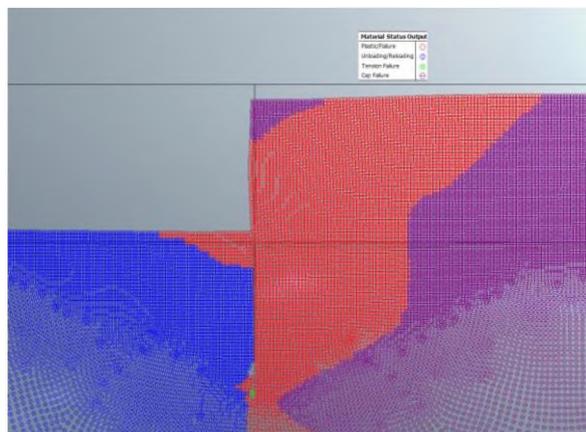


Рис. 4. Распространение зон предельного равновесия



Рис. 5. Эпюры давления на ограждение

В итоге получаем хорошее совпадение численного и аналитического решений: вид графиков примерно одинаковый. Разница лишь в том, что в численном расчете давление начинает расти несколько ниже. Так происходит из-за различного подхода к учету сцепления, при численном решении высота вертикального откоса, который удерживается за счет сцепления, больше, чем аналогичная высота при аналитическом подходе.

Но такая ситуация реализуется не всегда. Большое влияние на эпюру

давления оказывает жесткость ограждения и жесткость грунта (или относительная жесткость грунта относительно ограждения). При большой жесткости ограждения перемещения его становятся меньше, следовательно, активное давление реализуется в меньшей степени и давление на ограждение возрастает (так как давление покоя или тем более пассивное давление значительно превышают активное давление).

Рассмотрим пример грунта с большими жесткостными

характеристиками по сравнению с первым расчетом, а жесткость стойки, наоборот, снизим. В аналитическом плане в этом случае ничего не изменится, так как деформации грунта в теории предельного равновесия не определяются и жесткость не учитывается.

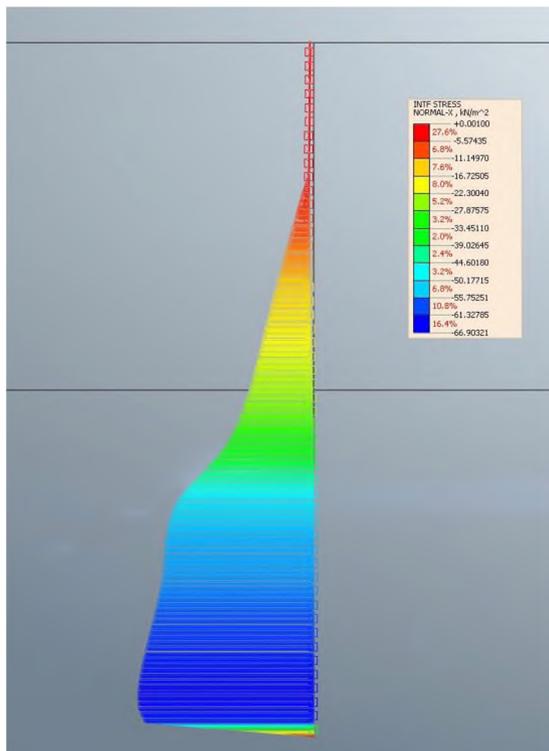


Рис. 6. Эпюра давления на ограждение по МКЭ

Видно, что эпюра имеет уже не треугольный вид. Поменялись также значения перемещений и области предельного равновесия. В случаях, когда ограждение имеет дополнительные конструкции крепления – анкеры, распорки и т.п., расхождение между численными и аналитическими подходами увеличивается. В случае массивных подпорных стен сложных очертаний, например уголковых, эпюры давлений также различаются достаточно сильно. На рисунке 7 представлены эпюры давлений на уголковую подпорную стену при численном решении и типичный вид эпюры по аналитическому решению.

В случае численных расчетов давлений следует уделять пристальное внимание учёту сцепления грунта. В комплексных геотехнических программах сцепление понимается как следствие некоторого переуплотнения грунта. Даже незначительная величина сцепления у грунта приводит к отсутствию давления у верха ограждения на значительную глубину.

Рассмотрим теперь практический случай расчета давления грунта на ограждение, закрепленное в скальном грунте и имеющее анкерное крепление (рис. 8).

В данном случае ИГЭ 5 и ИГЭ 6 являются скальными грунтами (оранжевый и зеленый цвет соответственно). Результаты стадийного расчета разработки котлована представлены на рисунках 9-13.

По рисункам 12 и 13 видна хорошая сходимость ручного и численного расчетов. Видно, что давление грунта есть только в пределах распространения дисперсных грунтов. Скальные грунты не оказывают давления вследствие наличия у них значительного сцепления. Однако следует учитывать, что стойки ограждения котлована погружаются в заранее пробуренные скважины и в дальнейшем эти скважины заполняются либо бетоном, либо щебнем, из-за чего какое-то давление все равно будет оказываться. Также, в случае значительной нагрузки на поверхности, давление сможет передаваться и через скальный грунт. Не стоит также полагать, что скальные грунты никогда не оказывают давления на ограждения. Наличие или отсутствие давления зависит от прочности и трещиноватости скального массива. В процессе бурения скважин может разрушиться структура массива скального грунта, что сопряжено с разрушением структурных цементационных невосстанавливаемых связей. В этом случае может иметь место сдвиг частей

скального массива относительно других частей по трещинам, тогда давление на ограждение будет значительно. Для принятия решения необходимы исследования скальных грунтов как в лаборатории, так и в полевых условиях для изучения трещиноватости массива.

Рабочая зона (зона, где возникают напряжения) распространяется на глубину 0,4 м. В реальности эта глубина зависит от свойств грунта и качества заделки. Пассивное давление по численным и аналитическим расчетам отличаются достаточно сильно. В ряде программ, производящих расчеты аналитическими способами, пассивное давление сильно преувеличивается. Такое преувеличение приводит к большой разнице между равнодействующими активного и пассивного давлений, а это в свою очередь приводит к скачку на эпюре поперечных сил и увеличению сечения ограждения, хотя в реальности такого скачка, конечно, не наблюдается. При расположении стоек ограждения с шагом, отличающимся от 1 м, значение

давления на ограждение в аналитических методах получается простым умножением полученных для 1м значений на шаг стоек. В реальности же некоторая часть давления будет передаваться на массив грунта и увеличивать напряжения в нём. Какая именно часть будет передаваться зависит от многих факторов, в первую очередь - от соотношения жесткостей грунта и ограждения. Простое умножение может быть применено в случае абсолютно жесткой заделки, которая не может перемещаться. Но в реальности ограждение всегда будет перемещаться и деформироваться, что приведет к перераспределению напряжений и изменению общего НДС системы. Учет данного фактора сильно сказывается на эпюрах усилий в ограждении и в конечном счете на экономичности проектного решения. Учесть сложное изменение давления в следствие перераспределения напряжений между грунтом и массивом грунта представляется возможным только численными методами.

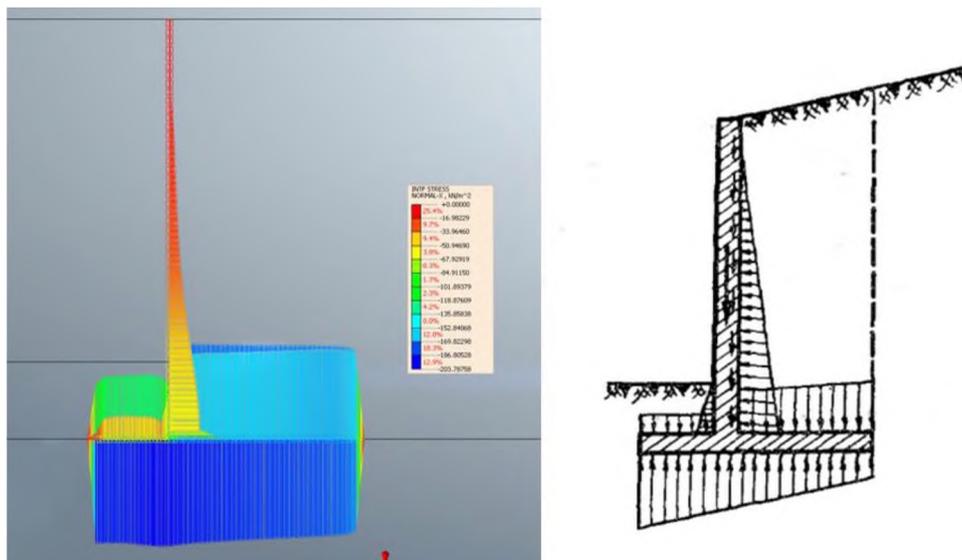


Рис. 7. Эпюры давления грунта на угловую подпорную стенку: слева – модель в ANSYS; справа – теоретическая схема

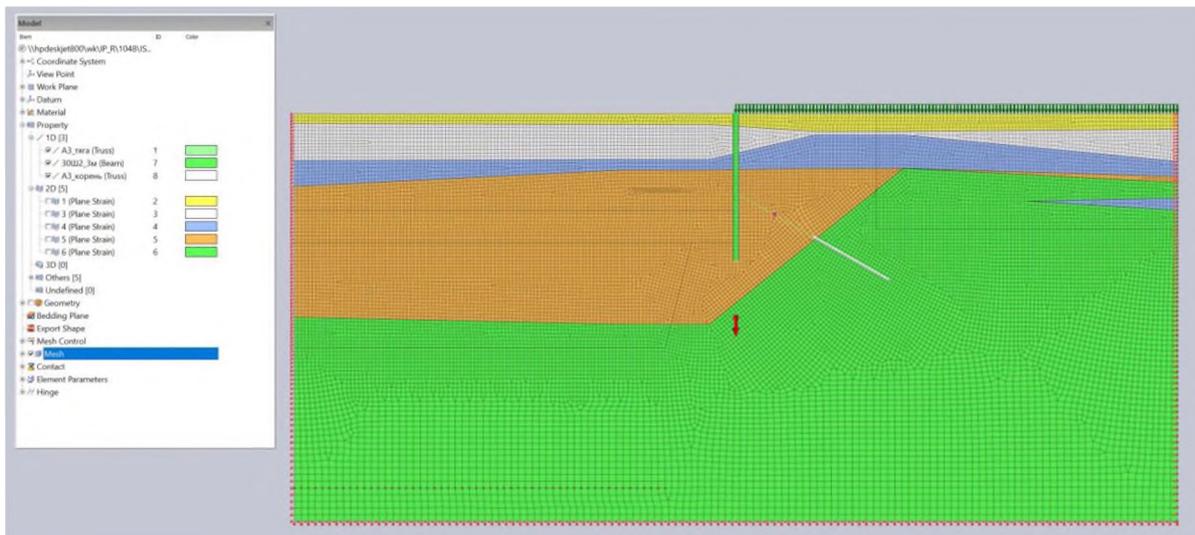


Рис. 8. Расчетная схема

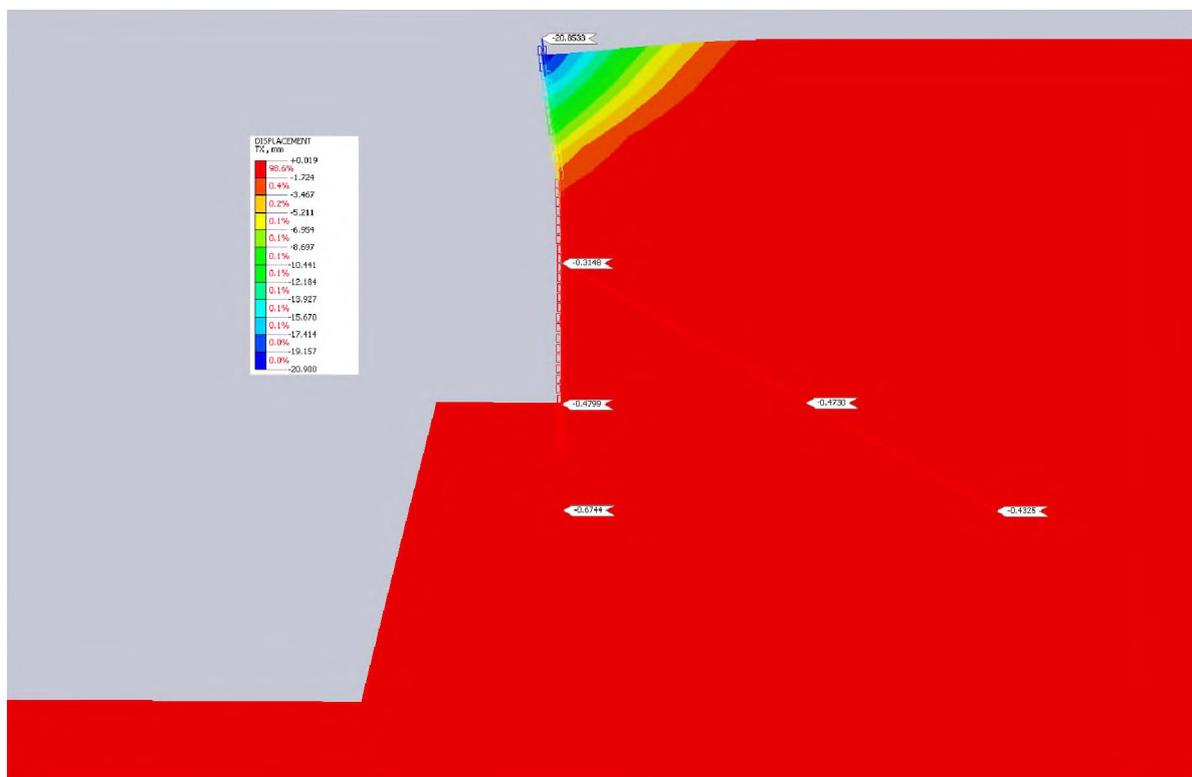


Рис. 9. Изополя горизонтальных перемещений на последней стадии разработки котлована

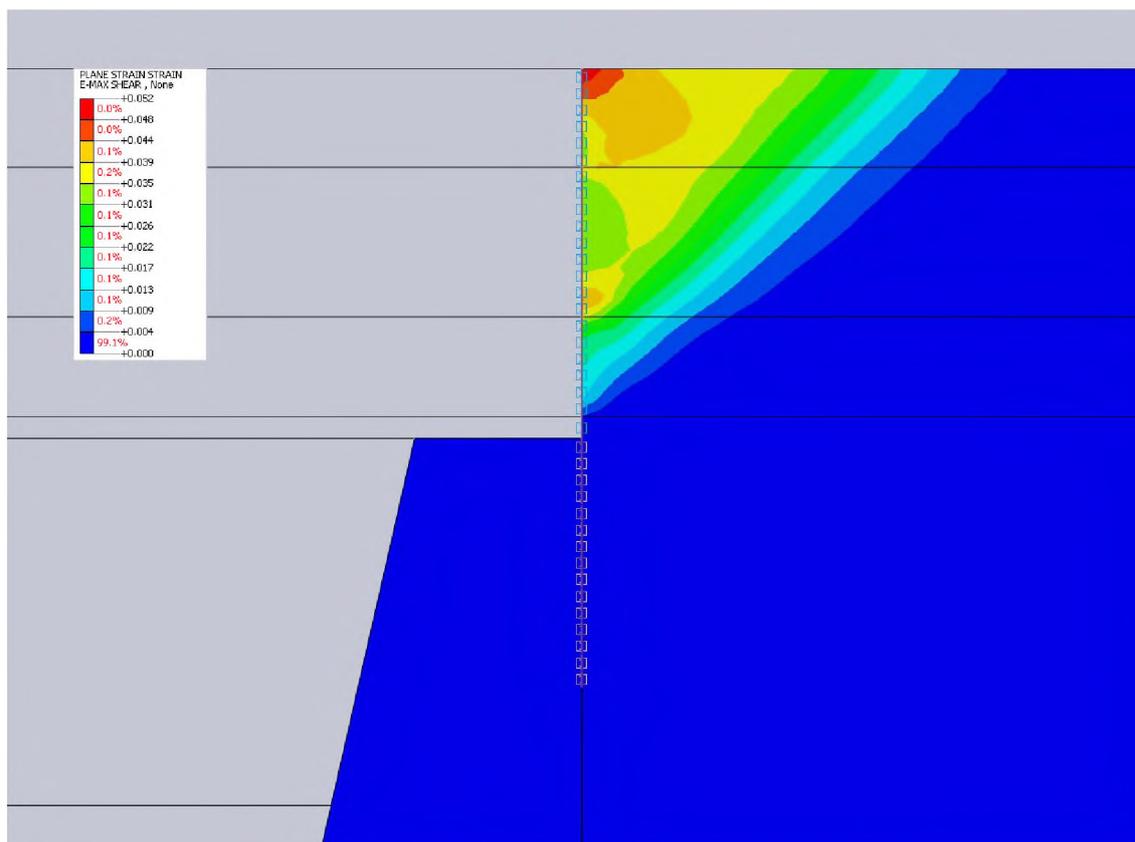


Рис. 10. Сдвиговые деформации в системе

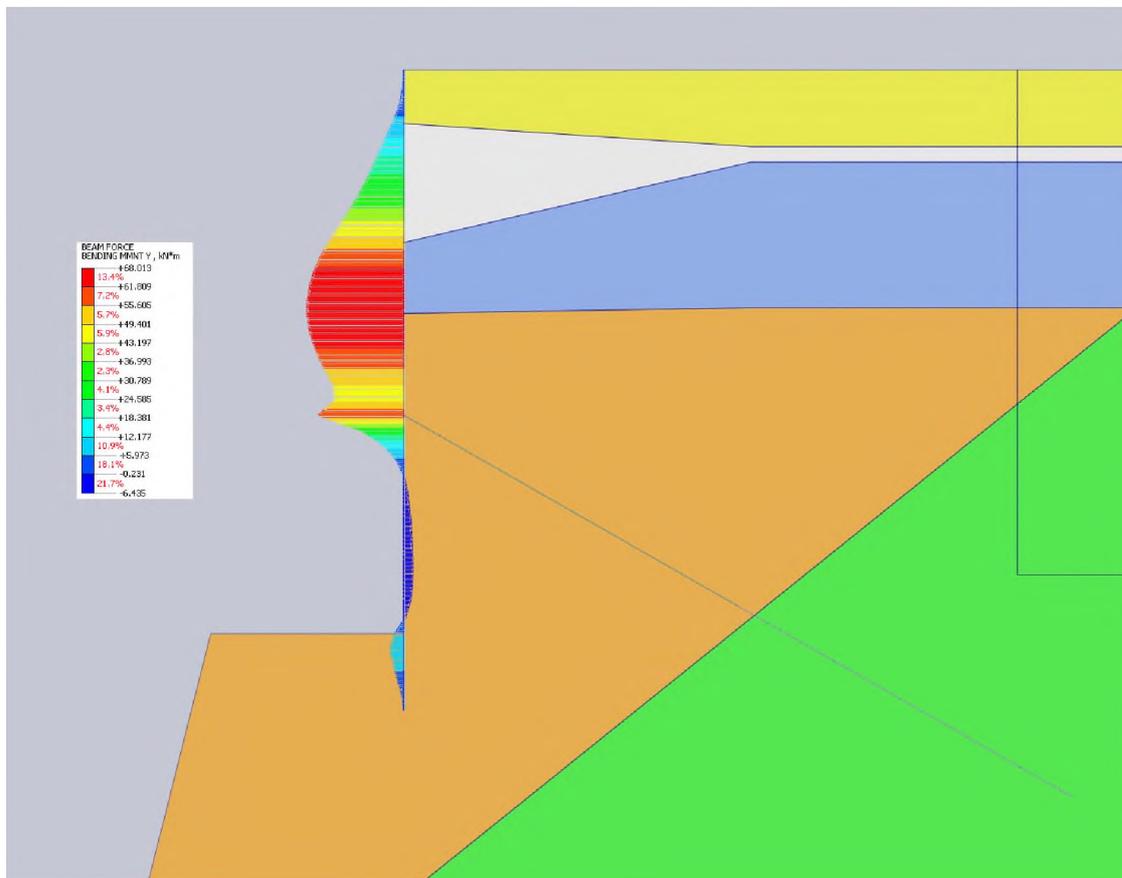


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов в ограждении котлована

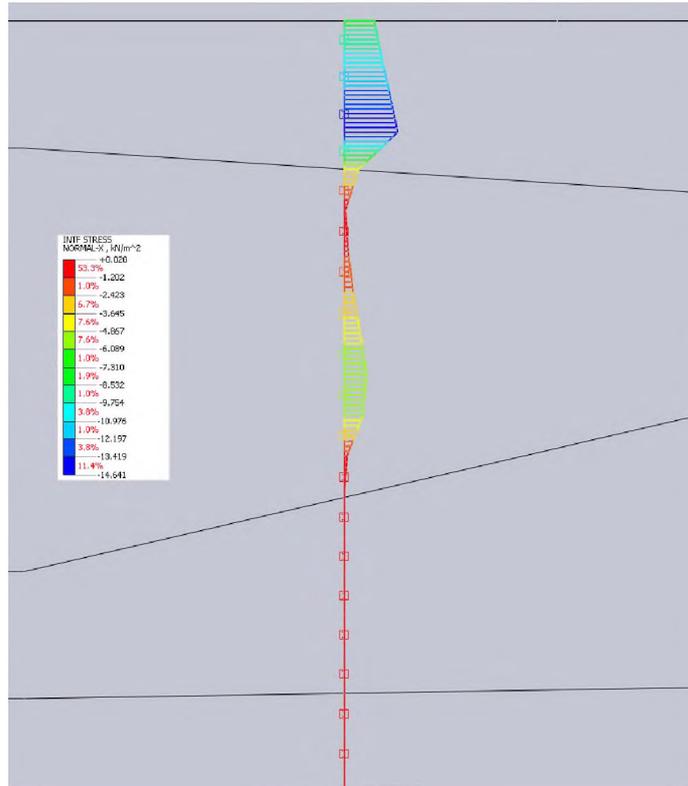


Рис. 12. Давление грунта на ограждение по численному расчету

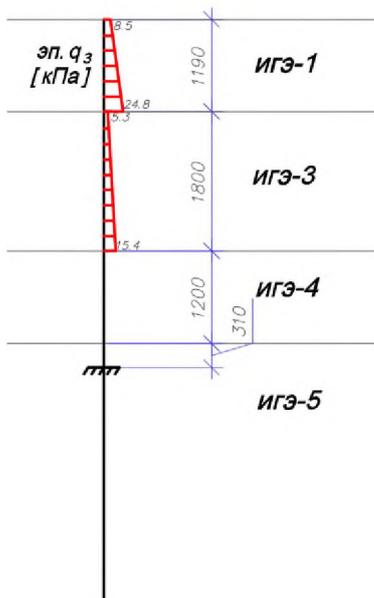


Рис. 13. Давление грунта на ограждение по аналитическому расчету

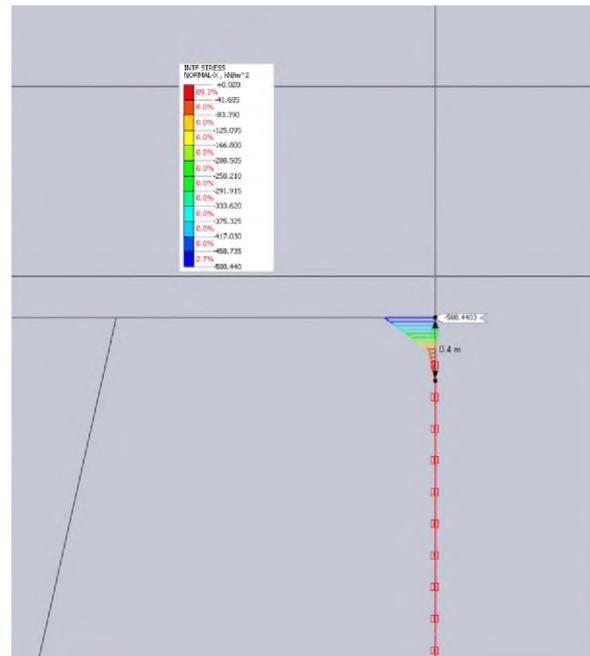


Рис. 14. Давление грунта слева от стенки на ограждение

3. Выводы

Метод конечных элементов позволяет определять давление грунтов на ограждения, учитывая при этом множество факторов. Переход к

активному либо пассивному состоянию грунта происходит автоматически, в зависимости от напряженного состояния в данной точке массива. Помимо этого, численные методы имеют ещё ряд преимуществ, таких как:

возможность учета сложной геологической обстановки, различных способов крепления стен, сложных нагружений, последовательности производства работ и других факторов. Для качественного представления о давлении и для проверки численных решений всегда можно и нужно использовать аналитические методы с последующим анализом и сопоставлением.

Список используемых источников

1. Клейн Г. К. Расчет подпорных стен. Ярославль: Высшая школа, 1964.
2. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Москва: Высшая школа, 1985
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2014. 728 с
4. Прагер В. Введение в механику сплошной среды / В. Прагер. – М.: Издательство иностранной литературы. 1963. – 312с.
5. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы / Н.М. Герсеванов. – М.: ОНТИ, 1937. – 241с.
6. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Госстройиздат, 1956. 252 с
7. Poncelet J. Memoire sur la stabilite de revetemens et de leurs, foundations // Memorial de l'officier du genie. P., 1840. Vol. 13.
8. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mech. and Foundation Division, ASCE, pp. 1629-1653.
9. Culmann C. Die graphische Statik. Zürich, 1866.
10. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 7. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf.
11. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 8. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.
12. Шашкин В.А. Решение задач предельного равновесия с использованием метода конечных элементов / В.А. Шашкин, К.Г. Шашкин, М.В. Дунаева // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2001. - №13. –С.61-95.
13. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542с.
14. Brinkgrvee, R.B.J., Shen, R.F. (2011). Structural Elements & Modelling Excavations in

Plaxis, Power Point Presentation File, Delf, the Netherlands

15. Potts, D.M, and Zdravkovic L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering., Thomas Telford, London.
16. Richard Magus. (2005). Report of the Committee of Inquiry into the incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004, Singapore
17. Gouw, Tjie-Liong. (2012). "Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented." Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change, SGCC2011, Retirement Symposium for Prof. Dennes T. Bergado, 20 - 21 June 2012, Bangkok, Thailand., pp. 259-27

References

1. Klein G. K. Raschet podpornih sten [calculation of retaining walls]. Yaroslavl: Vishaya shkola, 1964. (In Russian).
2. Ivanov P. L. Grynti I osnovaniya gidrotehnicheskikh sooryzheniy [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow: Vishaya shkola, 1985. (In Russian).
3. Spravochnik geotehnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemniye sooryzheniya [Geotechnics Reference Book. Foundations, foundations and underground structures] Moscow.: ACB, 2014. 728 s. (In Russian).
4. Klein G. K. Stroitel'naya mehanika sypuchih tel [Construction mechanics of bulk solids]. Moscow.: Gosstroyizdat, 1956. 252 s. (In Russian).
4. Preger, V. Vvedenie v mehaniku sploshnoy sredi [Introduction to Continuum Mechanics / V.Preger. – Moscow.:Izdatelstvo inostrannoy literaturi. 1963. – 312s. (In Russian).
5. Gersevanov, N.M. Osnovy dinamiki gryntovoy massi [Fundamentals of soil mass dynamics] / N.M. Gersevanov. – Moscow.: ONTI, 1937. – 241s. (In Russian).
6. Klein G. K. Stroitel'naya mehanika sipuchih tel. Moscow: Gosstroyizdat, 1956. 252 s
7. Poncelet J. Memoire sur la stabilite de revetemens et de leurs, foundations // Memorial de l'officier du genie. P., 1840. Vol. 13.
8. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mech. and Foundation Division, ASCE, pp. 1629-1653.
9. Culmann C. Die graphische Statik. Zürich, 1866.
10. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 7. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf.
11. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 8. URL:

plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.

12. Shashkin, V.A. Recheniye zadach predelnogo ravnovesiya s ispolzovaniem metoda konechnykh elementov [Solution of limit equilibrium problems using the finite element method] / V.A. Shashkin, K.G. Shashkin, M.V.Dunaeva // Razvitie gorodov i gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2001. - №13. – С.61-95. (In Russian).

13. Zenkevich, O.K. Metod konechnykh elementov v tehnikе [The finite element method in engineering]/ O.K. Zenkevich. – Moscow.:Mir, 1975. – 542s. (In Russian).

14. Brinkgreve, R.B.J., Shen, R.F. (2011). Structural Elements & Modelling Excavations in

Plaxis, Power Point Presentation File, Delf, the Netherlands

15. Potts, D.M, and Zdravkovic L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering., Thomas Telford, London.

16. Richard Magus. (2005). Report of the Committee of Inquiry into the incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004, Singapore

17. Gouw, Tjie-Liong. (2012).“Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented.” Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change, SGCC2011, Retirement Symposium for Prof. Dennes T. Bergado, 20 - 21 June 2012, Bangkok, Thailand., pp. 259-27