

В. А. Трофимов, И. Е. Шиповский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД, СОДЕРЖАЩЕГО ПОЛОСТЬ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. Н. В. Мельникова, г. Москва, Россия

Аннотация. Карстовые проявления широко распространены во многих регионах и представляют значительную опасность для проживания и хозяйственной деятельности. Воронки возникают при обрушении горных пород над подземными пустотами (пещерами, выработками и т.д.), образовавшимися при карстовом процессе или в результате антропогенного воздействия в массиве горных пород. Однако не каждая карстовая или техногенная полость приводит к разрушению земной поверхности, и, как правило, ее возникновение является неожиданным. В данной работе рассматривается динамика формирования провалов земной поверхности в виде карстовой воронки. Для этого с помощью бессеточного метода сглаженных частиц (SPH) решается геомеханическая задача. Выбранный численный метод позволяет получить решение задачи с учетом больших деформаций и возможных разрушений в процессе изменения напряженно-деформированного состояния. Используется критерий разрушения Друккера-Прагера, параметры которого со временем меняются в соответствии с накоплением повреждений, которые определяют временное развитие процесса разрушения, его начало и скорость.

Ключевые слова: карстовое разрушение, компьютерное моделирование, критерий разрушения Друккера-Прагера, бессеточный метод SPH.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.46.4.011

УДК: 551.44:539.3

1. Введение Значительные площади поверхности Земли сложены карстовыми породами, которые могут представлять большую опасность возникновения разрушения земной коры и ее опускания в виде небольших, но часто встречающихся кратеров

© Шиповский И. Е., Трофимов В. А., 2020

Трофимов Виталий Александрович

e-mail: asas_2001@mail.ru, д-р техн. наук, зав. лаб., ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова, Москва, Россия.

Шиповский, Иван Евгеньевич

e-mail: iv_ev@mail.ru, канд. техн. наук, ст. н. сотр., ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова, Москва, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-05-00912-А).

Поступила 20.06.2020

(рис. 1) [1]. Карст представляет собой сложный геологический процесс, вызванный

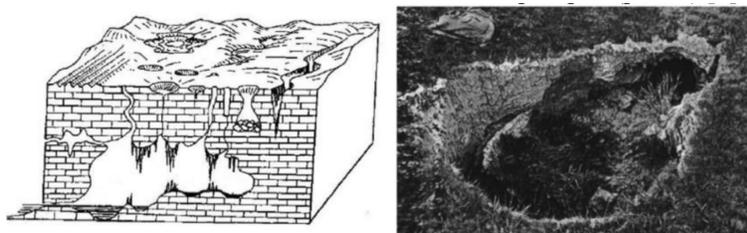


Рис. 1. Формы карстобразований

растворением подземными и (или) поверхностными водами горных пород, проявляющийся в их ослаблении, разрушении [2, 3]. По современной классификации различают 4 типа карста: открытый, закрытый, перекрытый и перекрытый в зависимости от наличия перекрывающих пород и их свойств [4]. Карстовые проявления, за исключением открытых, на первых этапах не имеют видимых признаков проявления и связаны с образованием и развитием зон размягчения в перекрывающих породах. Со временем они превращаются в полости и пещеры, возможно, заполненные водой. После этого перекрывающие породы могут разрушиться с образованием воронок. Характерной особенностью таких воронок во многих случаях является наличие на ранней стадии вертикальных стенок, которые со временем сглаживаются вследствие осыпания породы. Иногда такие стены не образуются, а оседание образуется в виде гладкой впадины. Изучение самого процесса разрушения, закономерностей деформации и разрушения грунта перекрывающего слоя, механизмов образования воронок представляет собой проблему, рассмотрению которой посвящена данная статья.

2. Теория Если напряжения вокруг карстовой полости не достигают критических значений, то, исходя из расчета напряженно-деформированного состояния массива вблизи полости в рамках стационарной модели, невозможно предсказать ее развитие и оценить риск динамического разрушения окружающей горной породы. В рамках такой модели горный массив с карстовой полостью не разрушается, а трещины и повреждения поверхности могут развиваться только при дополнительной нагрузке, например, при строительстве массивного объекта вблизи полости [4]. На практике разрушение поверхности может происходить и при отсутствии значительного антропогенного воздействия и часто не сразу, а через определенный, иногда очень большой, временной интервал. Моделирование карста с использованием классических критериев прочности может быть неадекватным, поскольку фактическое развитие трещин в массиве часто начинается и происходит при напряжениях ниже критического значения. Это связано главным образом с тем, что с течением времени геометрические параметры полости изменяются благодаря ее росту, и вследствие этого увеличения происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Параллельно с этим происходит процесс разрушения горных пород и накопления в них повреждений, т.е. ухудшение деформационно-прочностных свойств горных пород. В представляемой численной модели считается, что физико-механический процесс происходит во времени и может быть описан на основе решения полной системы уравнений механики деформируемого твердого тела совместно с уравнением

накопления повреждений. Параметры прочности среды ослабляются в соответствии со значением параметра разрушения D . Используемое в данной статье уравнение накопления повреждений, а также упруго-пластическая модель представлены в [5, 6]. Ранее в работах [5–7] было продемонстрировано решение ряда практических задач с использованием этого подхода. Кроме того, в модели используется модель пластичности Друккера-Прагера. В этом случае упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния. Превышение значений параметров среды этих границ запускает процесс неупругой деформации в соответствии с уравнениями предельной поверхности и потенциала пластичности.

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p = 0), \quad (1)$$

где f - уравнение поверхности нагружения. Пластическая деформация определяется из выражения

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

где $g(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0$ - пластический потенциал; параметр $d\lambda$ вычисляется в процессе деформации из условия пластичности; ϵ_{ij}^p - компоненты тензора пластической деформации.

Предельная поверхность в области деформации сдвига в диапазоне давлений $P^* \leq P \leq P_0$ описывается уравнением

$$f_1(P, \tau) = \tau - \alpha P - Y \quad (3)$$

а при давлениях $P > P_0$ - уравнением

$$f_2(P, \tau) = \frac{(p - p_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0 \quad (4)$$

Здесь $\tau = (\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij})^{0.5}$ - интенсивность сдвиговых напряжений; P^* это давление, при котором происходит хрупкое разрушение на разрыв; P_0 - пороговое давление, при котором начинается уплотнение материала; $a = (P_1 - P_0)$, $b = c + \alpha P_0$. Параметры $\alpha = \alpha(\epsilon_p, P)$, $Y = Y(\epsilon_p, P)$, которые описывают поверхность Друккера-Прагера, могут быть выражены через угол внутреннего трения φ и сцепление C модели Кулона-Мора.

Ослабление нагружаемой геосреды с течением времени учитывается через функцию накопления повреждений

$$D(\sigma_{ij}, t) = \int \frac{(S - S^0)^n}{(S^*)^n t^*} dt, \quad (5)$$

для $S > S_0$.

S - эффективное напряжение; S_0, S^*, t^*, n - параметры, определяющие пороговое напряжение, начиная с которого накапливается повреждение, предельное напряжение и параметры, характеризующие скорость накопления повреждения. В этом случае уравнение, описывающее упрочнение и размягчение, дополняется коэффициентом $(1 - D(\sigma_{ij}, t))$, содержащим кинетическую функцию D (5). При таком подходе механики разрушения среды обычно используются соотношения теории пластичности, и разделение на пластическую и хрупкую деформацию становится условным. В этом случае объемные изменения, связанные с образованием микротрещин, учитываются без перехода на макроуровень и, соответственно, без использования специальных процедур для описания трещин. Такой подход оправдан в случае множественного

разрушения без образования магистральных трещин. Его применение особенно эффективно в задачах, связанных с деформацией горных пород при сжатии и сдвиге. Таким образом, повреждение рассматривается как увеличение неубывающей переменной D , которая соответствует текущему напряженному состоянию и состоянию повреждения. Это интерпретируется как начало образования трещин. Повреждение меняет некоторые свойства материала. В динамических условиях это позволяет пространственно локализовать участки с быстро растущим повреждением, сопровождающимся разрыхлением, что меняет картину напряженно-деформированного состояния окружающей породы. Важным свойством параметров повреждений является их взаимодействие и обратная связь с другими параметрами напряженно-деформированного состояния. Считается, что ослабление, смягчение и разъединение в результате повреждения функционально устанавливаются через модули:

$$K = (1 - D^2)K_0, \mu = (1 - D^2)\mu_0, \tau = (1 - D^2)\tau_0 \quad (6)$$

При этом размягчение материала от повреждений, вызванных растяжением, уменьшает модуль объемного сжатия K , модуль сдвига μ , и предел текучести τ от их исходных значений для неповрежденного материала K_0 , μ_0 и τ_0 . Компоненты тензора сжимающих напряжений не уменьшаются по мере разрушения, так как материал в области разрушения остается способным передавать сжимающие нагрузки. В данной статье для решения поставленной краевой задачи используется метод сглаженных частиц (SPH). Этот метод включает в себя все необходимые алгоритмы учета разрушения материала под нагрузкой и зарекомендовал себя при исследовании задач геомеханики [5–9].

3. Постановка задачи На рисунке 2 показана начальная конфигурация задачи. Область расчета представляет собой прямоугольник размером 200x150 м с квадратной выемкой 20x20 м, имитирующей карстовую полость на глубине 50 м. В этом случае верхняя граница области 1 является свободной дневной поверхностью. На поверхно-

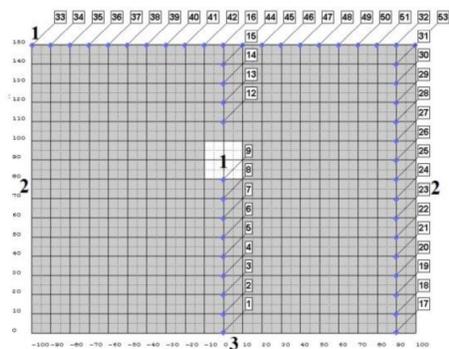


Рис. 2. Начальная конфигурация задачи

стях 1, 2, 3 расчетной области задаются граничные условия. Числами 1 обозначены свободные поверхности (дневная и полость), на поверхностях 2 - реализуются условия полного поглощения возникающих в процессе деформации и разрушения волн нагружения и на поверхности 3 задается условие жесткой стенки. Метки на рисунке и

соответствующие номера внутри указывают места и количество компьютерных датчиков, в которых регистрируются изменения значений параметров массива горной породы (смещения, скорости, повреждения D и т.д.). На начальном этапе моделирования расчетная область некоторый протяженный период времени находится под действием мгновенно приложенной силы тяжести. В результате этого в области формируется поле динамических напряжений, которое через определенный промежуток времени переходит в стационарное, которое будем считать исходным. Следует иметь в виду, что прочность постепенно уменьшается со временем даже при сохранении постоянных напряжений. Более того, в какой-то момент критерий срабатывает, и начнется постепенное динамическое разрушение. Далее этот момент времени будет считаться начальным, т.е. $t = 0$, для задачи динамического разрушения.

4. Результаты расчетов Как отмечалось ранее, формирование воронки является, в определенном смысле, конечной стадией карстового процесса, который постепенно развивается в окружающем массиве породы.

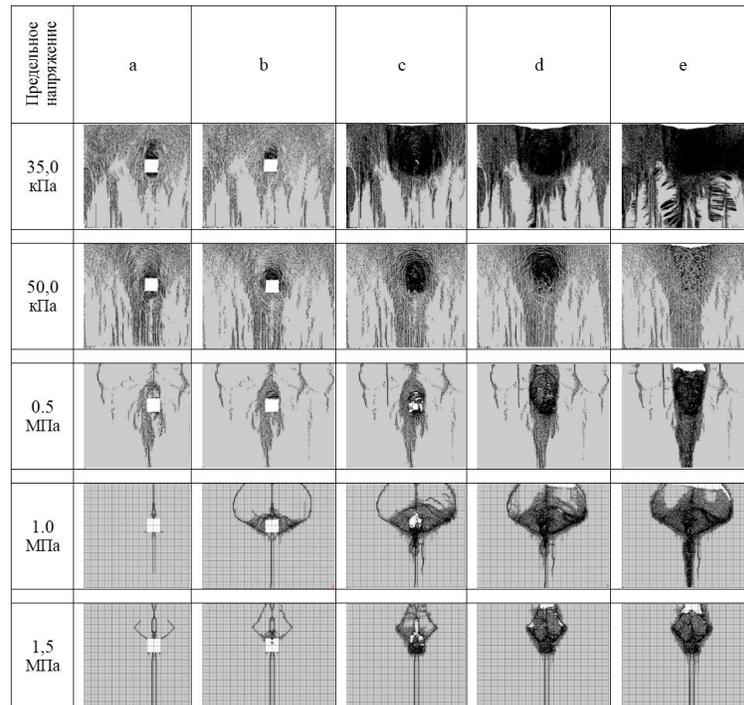


Рис. 3. Рассчитанные последовательности состояния массива при формировании карстовой воронки

На рисунке 3 показаны изменения состояния массива в некоторые последовательные моменты времени: а - зарождение главной вертикальной трещины в начале схождения вертикальных стенок полости и некоторого расхождения боковых под воздействием горного давления; б - развитие оседания кровли карстовой полости; в - активная стадия схождения, приводящая к полному обрушению кровли; г - полное схлопывание всего пространства карстовой полости, что приводит к оседанию дневной

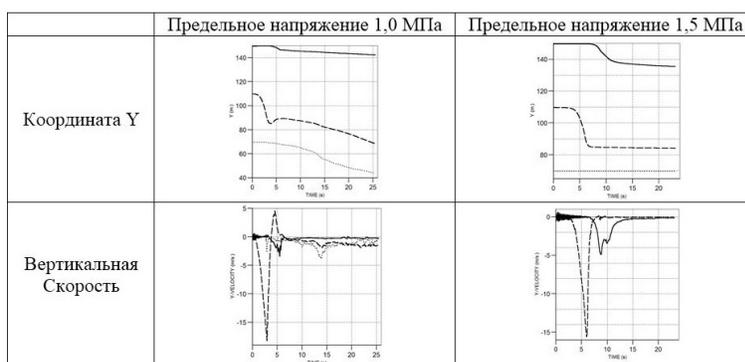


Рис. 4. Изменения во времени вертикального смещения и скорости в зависимости от прочностных свойств горной породы в выбранных точках

поверхности; е - финальная стадия образования карстовой воронки или разрушения. Следует отметить, что в массиве, состоящем из менее прочных горных пород, происходит более сильное рыхление перекрывающих пород и образуется более плоская впадина в виде традиционной мульды. В более прочных скальных материалах наблюдается формирование карстовых воронок в виде провалов с ярко выраженными крутыми стенками. Следует отметить, что образование воронки на поверхности земли существенно зависит от глубины расположения карстовой полости, ее горизонтальных размеров, деформационно-прочностных свойств и степени разрыхления разрушающегося материала. При сильном разрыхлении этот материал может заполнить развивающуюся полость и поддерживать кровлю еще до того, как полость выходит на поверхность, предотвращая ее развитие. В этом случае карст реализуется в виде только определенного проседания. В той или иной степени это отражено на рисунках в верхних двух рядах рис. 3. Такие явления наблюдаются при разработке месторождений полезных ископаемых, особенно солевых образований, угольных пластов, когда деформации выходит на поверхность земли, фактически нарушая земную поверхность [10].

На рисунке 4 для пород различной прочности представлены графики изменений параметров массива в характерных точках, отражающих влияние образования карста.

Сплошные линии на рисунке 4 соответствуют параметрам дневной поверхности в осевой точке, пунктирная линия - это крыша полости, точки - подошва. Из графиках можно заметить не совсем очевидный факт, что в более прочных породах оседание массива более интенсивное.

5. Заключение Результаты компьютерного моделирования показывают, что прочностные свойства горных пород существенно влияют на характер получаемых структур разрушения (размер фрагментов и блоков, направление трещин, ширина и глубина провала), а также на динамику поведения геологического слоя над образовавшейся карстовой полостью. Поврежденная среда с дефектами подвержена быстрому разрушению в течение нескольких секунд с образованием оседания породы в виде воронки или провала с вертикальными стенками. Последнее характерно для более прочных вскрышных и окружающих пород. Численный анализ показывает четкую связь между интенсивностью сейсмического разрушения и интенсивностью сейсмического

излучения. Таким образом, моделирование может быть использовано для разработки методов прогнозирования разрушения карстового покрова на основе компьютерного сейсмического мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Короновский Н. В. Общая геология: учебник. М.: КДУ. 528 с.
- [2] СП 116.13330.2012. СНиП 22-02-2003 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. 2012.
- [3] Дублянская Г. Н., Дублянский В. Н. Метод возмущений в теории упругопластического тела. Новосибирск: СО РАН, 1992. 144 с.
- [4] Modeling of karst deformation and analysis of acoustic emission during sinkhole formation / R. A. Bakeev, Y. P. Stefanov, A. A. Duchkov et al. // AIP Conference Proceedings. Vol. 2051. 2017. p. 020170.
- [5] Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Numerical simulation of the stress-strain state of a coal seam caused by an explosion of a blast-hole charge with an annular gap // EPJ Web of Conferences. XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS-2019). Tomsk, 2019. Vol. 221. p. 01053.
- [6] Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Simulating Explosive Effect on Gas-Dynamic State of Outburst-Hazardous Coal Band // Journal of Mining Science. Vol. 55(4).
- [7] Trofimov V. A., Shipovskii I. E., Malinnikova O. N. Wen-Jie Xu Numerical Approach to Computer Simulation of Landslid Events // AIP Conference Proceedings. 2019. p. 020329.
- [8] Моделирование влияния пульпообразных масс в толще отвала на динамику развития оползневых зон / В. Н. Захаров, О. Н. Малинникова, В. А. Трофимов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Т. 1. с. 359–378.
- [9] Шиповский И. Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Науковий вісник НГУ. 2013. Т. 1, № 145. с. 76–82.
- [10] К вопросу о напряженно-деформированном состоянии областей, подверженных карстогенезу / А. А. Барях, Е. П. Русин, С.Б. Стажевский [и др.] // ФТПРПИ. 2009. Т. 6. с. 3–10.

V. A. Trofimov, I. E. Shipovskii

SIMULATION THE DEFORMATION AND DAMAGE OF A ROCK MASSIVE CONTAINING A CAVITY

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Abstract. Karst manifestations are widespread in many regions and pose a significant danger to residence and economic activity. Failing funnels arise during the collapse of rocks over underground voids (caves, workings, etc.), formed during karst formation or in the process of anthropogenic doing in the rock massive. However, not every karst or technogenic cavity gives rise to a failure of the earth's surface, and as a rule, its occurrence is unexpected. In this work, we consider the dynamics of the formation of dips of the earth's surface in the form of a collapse pipe. To do this, the geomechanical problem is solved by the meshless code Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). The method allows to obtain a solution to the problem taking into account large deformations and possible discontinuities in the process of changing the stress-strain state. The Drucker-Prager fracture criterion is used, the parameters of which change over time in accordance with the accumulation of damage, which determines the temporary development of the fracture process, its beginning and speed.

Keywords: karst failure, computer simulation, Drucker-Prager fracture criterion, meshless SPH code.

REFERENCES

- [1] Koronovsky N. General Geology: Textbook. M.: CDU. p. 528.
- [2] 2012. SP 116.13330.2012. SNiP 22-02-2003 Engineering protection of territories, buildings and structures from hazardous geological processes. Key points.
- [3] Dublyanskaya G. N., Dublyansky V. N. Perturbation method in the theory of an elastoplastic body. Novosibirsk: SB RAS, 1992. 144 p.
- [4] Modeling of karst deformation and analysis of acoustic emission during sinkhole formation / R. A. Bakeev, Y. P. Stefanov, A. A. Duchkov et al. // AIP Conference Proceedings. Vol. 2051. 2017. p. 020170.
- [5] Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Numerical simulation of the stress-strain state of a coal seam caused by an explosion of a blast-hole charge with an annular gap // EPJ Web of Conferences. XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS-2019). Tomsk, 2019. Vol. 221. p. 01053.
- [6] Odintsev V. N., Shipovskii I. E. Simulating Explosive Effect on Gas-Dynamic State of Outburst-Hazardous Coal Band // Journal of Mining Science. Vol. 55 (4).
- [7] Trofimov V. A., Shipovskii I. E., Malinnikova O. N. Wen-Jie Xu Numerical Approach to Computer Simulation of Landslid Events // AIP Conference Proceedings. 2019. p. 020329.
- [8] Modeling the influence of pulp-like masses in the dump on the dynamics of landslide zones development / V. N. Zakharov, O. N. Malinnikova, V. A. Trofimov [и др.] // Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences. 2020. T. 1. c. 359–378.
- [9] Shipovskiy I. E. Calculation of brittle failure of rocks using the meshless method // Scientific journal of NSU. 2013. Vol. 1, no. 145. p. 76–82.
- [10] On the question of the stress-strain state of areas subject to karstogenesis / A. A. Baryakh, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky et al. // FTPrPI. 2009. Vol. 6. p. 3–10.

Trofimov Vitaly Aleksanrovich, Dr. Tech. Sciences, Head Lab., Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Shipovskiy, Ivan Evgenievich Cand. Tech. Sciences, Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.