

УДК 624.131.537

О расчете параметров карстового провала

Ковалёв Владимир Александрович

Заведующий лабораторией №12 НИИОСП им. Герсеванова, руководитель Группы компаний "Олимппроект", канд. техн. наук.

Патрикеев Антон Борисович

Инженер, заместитель заведующего лабораторией №12 НИИОСП им. Н.М. Герсеванова ОАО «НИЦ «Строительство», директор по геотехнике и изысканиям группы компаний "Олимппроект"

Аннотация

В статье приводится описание и сравнительный анализ наиболее часто применяемых аналитических методов определения параметров карстового провала, а также описывается предложение по определению параметров карстового провала в современных программных комплексах конечно-элементного моделирования, в частности, PLAXIS.

Ключевые слова: карст, карстовый провал, диаметр, расчет, Plaxis

Abstract

The article provides a description and comparative analysis of the most frequently used analytical methods for the determination of the parameters of sinkhole, and outlines a proposal for the definition of the parameters of sinkhole in systems of finite element modeling, such as PLAXIS

Key Words: karst, sinkhole, diameter, calculation, Plaxis

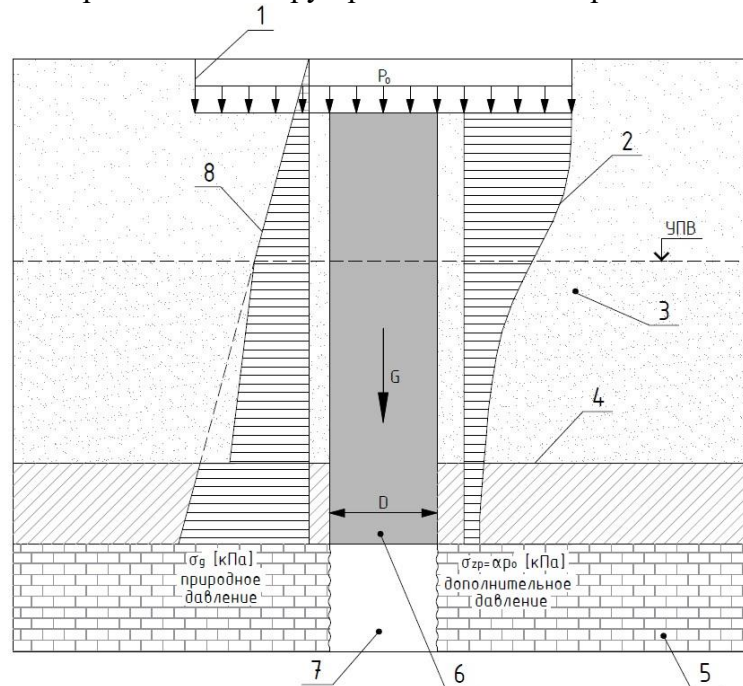
В соответствии с требованиями и рекомендациями нормативных документов [1, 2], приложений, содержащихся в технической литературе [3-6] и др. карстовые деформации характеризуются:

- провалами в виде вертикальных опусканий земной поверхности, сопровождающегося обрушением толщи грунтов над карстовыми полостями в карстующихся породах;
- оседаниями, т.е. воронкообразными вертикальными деформациями земной поверхности с максимальными величинами в центральной части и уменьшениями по периметру их до нуля;
- провалами с образованием по периметру их оседанием поверхности основания или земной поверхности.

Основную опасность для большинства зданий и сооружений представляют именно провалы [3-7]. Поэтому, основным расчетным параметром при проектировании фундаментов и в целом противокарстовой защиты зданий и сооружений является расчетный диаметр провала. Большое значение при проектировании также имеет форма провала.

При определении расчетного диаметра карстового провала наиболее часто применяются аналитические методы, основанные на использовании модели А. Бирбаумера [4-7] или методиках, описанных в работах А.В. Аникиева [5, 6].

Методика определения диаметра карстового провала по А. Бирбаумеру основывается на условиях равновесия круглоцилиндрического столба грунта, зависающего над карстовой полостью [2-5]. При этом диаметр рассматриваемого цилиндра принимается равным диаметру предполагаемой карстовой полости (рис. 1).



1 – контур сооружения; 2 – эпюра дополнительного давления; 3 – песчаный грунт; 4 – кровля перекрывающих глинистых грунтов; 5 – карстующиеся породы; 6 – цилиндрический столб грунта; 7 – полость в карстующихся породах; 8 – эпюра природного давления

Рис. 1 – Расчетная схема для определения диаметра карстового провала

Исходя из условия равновесия (отсутствия дефицита удерживающих сил) ($\sum F_i < \sum N_i$), критическая величина диаметра карстового провала (расчетный диаметр провала) определяется по включенной в Рекомендации [2] формуле:

$$D = 4 \cdot \frac{\sum (c_i \cdot h_i + \Delta f_i)}{q_i} \quad (1)$$

здесь $\Delta f_i = (\sigma_{zgi} + \sigma_{zpi}) \cdot (1 - \sin \varphi_i) \cdot \tan \varphi_i \cdot h_i$; $q_i = \sigma_{zgi} + \sigma_{zpi}$,

где c_i , φ_i – характеристики i -го слоя грунта толщиной h_i ; σ_{zgi} – среднее значение вертикального напряжения в i -ом слое грунта от собственного веса грунта; σ_{zpi} – среднее значение вертикального напряжения в i -ом слое грунта от внешней нагрузки.

Этот метод расчета достаточно прост и может применяться на участках с чередованием песчаных и глинистых грунтов с использованием средневзвешенных значений прочностных и др. характеристик отдельных инженерно-геологических элементов. При этом имеется возможность учета влияния дополнительной нагрузки от проектируемых сооружений на величину расчетного диаметра карстового провала.

К основным недостаткам данного метода следует отнести то, что форма разрушения грунтового массива вследствие провалообразования рассматривается в виде цилиндрического объема без учета изменения его формы по глубине.

Основное ограничение рассматриваемого метода расчета диаметра карстового провала связано с понятием критической толщины слоя перекрывающего массива. При данной толщине перекрывающего массива вертикальное давление у основания цилиндрического столба достигает своего максимума [5, 6]. В данном случае, величина этого давления может определяться как отношение разности сдвигающих и удерживающих сил к площади основания рассматриваемого грунтового цилиндра.

Значение толщины перекрывающего слоя может быть различной и зависеть от геологических особенностей рассматриваемой площадки, в частности, в случае преобладания в пределах толщи связных грунтов, она значительно меньше, чем в случае преобладания песчаных грунтов.

В работе А.В. Аникиева [6] значение критической толщины перекрывающего массива $h_{кр}$ рекомендуется определять по формуле (2), в данной работе также приведен график зависимости величины вертикального напряжения в основании цилиндрического столба от толщины слоя, перекрывающего карстующиеся породы (рис 2).

$$h_{кр} = (R - \frac{2c}{\gamma}) / 2 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \tan \varphi \quad , \quad (2)$$

где φ , c – угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта перекрывающего слоя; γ – объемный вес грунта перекрывающего слоя; R – радиус основания рассматриваемого цилиндрического столба грунта.

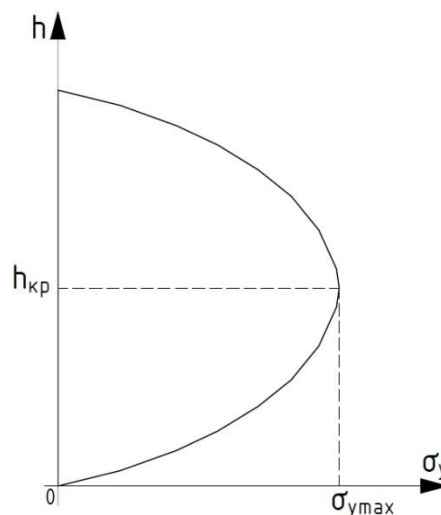


Рис. 2 – График зависимости величины вертикального давления σ_y в основании цилиндрического столба от толщины слоя h , перекрывающего карстующиеся грунты

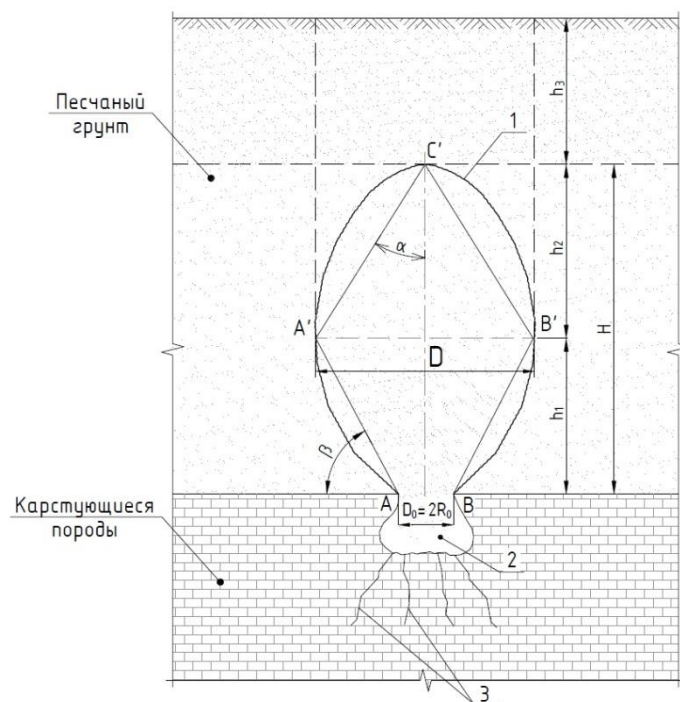
Из зависимости (2) следует, что при толщине слоя перекрывающего массива, превышающем критическое значение, вертикальное давление у основания цилиндрического столба будет уменьшаться и может исчезнуть полностью. Однако, в соответствии с опытными данными, критическое давление не уменьшается по глубине, и уж тем более не может исчезнуть полностью. Согласно исследованиям, приведенным в работе [9], оно лишь может стабилизироваться на определенных глубинах.

С учетом отмеченных особенностей модель провалообразования А. Бирбаумера может использоваться только в тех случаях, когда толщина слоя перекрывающей толщи не больше критического значения ($h_{кр}$).

Для участков с геологическим строением, характеризующихся толщиной слоя перекрывающей толщи, превышающей критическое значение ($h_{кр}$), наиболее целесообразно применение модели карстообразования, базирующейся на зависимостях кинематики и механизме массовой суффозии [5], предложенных А.В. Аникиевым.

В соответствии с этой моделью, определение расчетного диаметра карстового провала в несвязных грунтах основано на вычислении размеров ослабленной (разуплотненной) зоны на поверхности рельефа, образующейся вследствие суффозионных процессов при образовании полости в карстующихся породах.

Кинематика и механизм массовой суффозии хорошо объясняются существованием зональной области влияния ослабленного участка массива пород, схематическое строение которой по работе [5] показано на рис. 3.



1 – очертание разуплотненной области в песчаном грунте;
 2, 3 – соответственно полость и трещины в карстующихся породах

Рис. 3 – Схема разуплотненной зоны при массовой суффозии

Схема, приведенная в работе [5], дополнена областью условно устойчивого грунта толщиной h_3 , располагающейся над куполообразной областью ослабленного несвязного (или малосвязного) грунта. Очевидно, что при определенных условиях и влиянии различных факторов область условно устойчивой толщи грунта может оказаться в неустойчивом состоянии, вследствие чего произойдет выход карстового провала на поверхность. Такими условиями и факторами могут являться:

- снижение толщины условно устойчивого грунта h_3 до критического значения $h_{3кр}$ за счет увеличения полости в известняках – D_0 , что приведет к увеличению D_k и H ;

- снижение прочностных характеристик (φ и c) грунтов в области h_3 под влиянием сезонного увеличения их влажности, а так же утечек воды из инженерных коммуникаций, повышения уровня подземных вод и зоны капиллярного влияния и т.п.;

- наличие динамических (ударных, вибрационных и др.) и статических воздействий в виде местной пригрузки или наоборот, частичная срезка грунтов над областью толщиной H и т.п.

Учет этих и др. факторов при определении возможного значения $h_{3кр}$ должен являться предметом специальных исследований.

Из теории строительной механики в куполах и сводах грунтовых массивов над зоной частично разуплотненного грунта в пределах высоты h_2 , имеющих форму арок, напряженное состояние в основном определяется сжимающими напряжениями, а в опорных частях арок (по линии $A'B'$ рис. 3) вертикальными сжимающими, а также горизонтальными напряжениями, направленными вглубь грунтового массива (от точек A' и B').

Поэтому, возникновение провалов может происходить, как за счет разрушения с выдавливанием верхних частей арочных куполов или сводов, так и обрушения их по периметру условных линий $A'B'$ внутрь разуплотненной области 1 (см. рис. 3).

По приведенной на рис. 3 схеме основные параметры карстовой полости характеризуются шириной D и высотой разуплотненного участка H . Ширина карстовой полости D определяется по формуле:

$$D = \frac{D_0 \cdot (1 + \sin \varphi)^2}{4 \cdot \sin \varphi^3}, \quad (3)$$

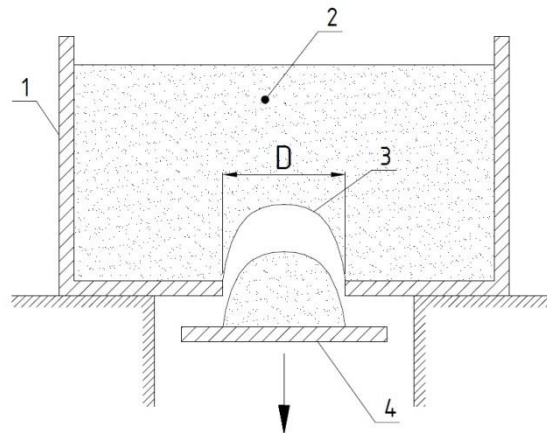
где φ – угол внутреннего трения, D_0 – размер карстовой полости.

Высота H области влияния ослабленного несвязного грунта принимается равной:

$$H = h_1 + h_2 = \frac{D - D_0}{2 \cdot \tan \varphi} + \left(\frac{D - D_0}{2}\right) \times \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{D - D_0}{2 \cdot \tan \varphi} + \left(\frac{D - D_0}{2}\right) \times \tan(\beta), \quad (4)$$

где $\beta = \pi/4 + \varphi/2$, $\alpha = \varphi$, φ – угол внутреннего трения, D_0 – размер карстовой полости.

В случае наличия слоя связных грунтов, перекрывающих карстующиеся породы (наличие перекрывающего глинистого слоя 4, приведенного на рис. 1), провалообразование будет сопровождаться нарушением сплошности слоя связных грунтов (изгибе над карстовой полостью) и образованием трещин отрыва в вышележащей толще несвязных грунтов. Протекание данных процессов выявлено при проведении опытов М.М. Протоdjаконовым [9]. В частности, в процессе проведения данных опытов (рис. 4), при опускании щитка, прикрывающего отверстие в днище испытательного стенда с влажным песком, наблюдалось именно образование свода разрушения размером D [9].



1 – лоток; 2 – влажный песок; 3 – свод; 4 – поддон

Рис. 4 – Схема опытов М.М. Протодяконова

На основании опытов, приведенных в работе [9] были получены зависимости, позволяющие получить размер основания данного свода.

$$D = h \cdot \tan \varphi \quad (5)$$

где h – высота свода песков; φ – угол внутреннего трения песков.

Для связных грунтов (рис. 5) коэффициент трения заменяется коэффициентом крепости горных пород, являющийся отношением их сдвиговой прочности к величине сжимающих напряжений σ_z на уровне подошвы свода, т.е.

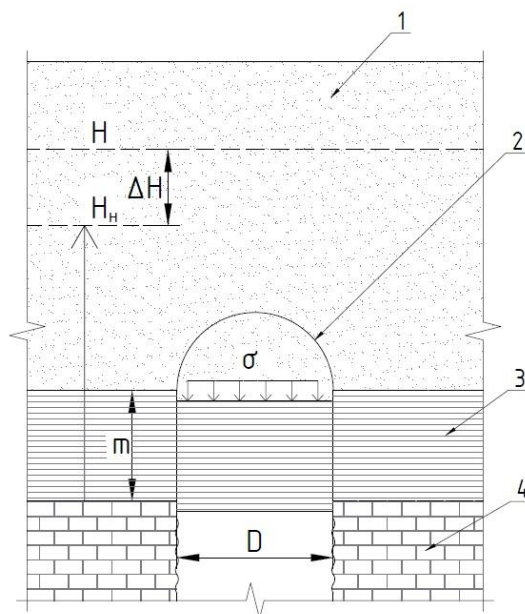
$$D = 2m \cdot \left(\tan \varphi + \frac{c}{\sigma_z} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_z = \sigma + \sigma^* \quad (7)$$

$$\sigma = \gamma_1 \cdot (h_1 + m - H) + \gamma'_1 \cdot (H - m) \quad (8)$$

$$\sigma^* = (\gamma'_1 + \gamma_w \cdot I) \cdot m \quad (9)$$

где c и φ – сцепление и угол внутреннего трения глин; γ_1 , γ'_1 – соответственно объемный вес влажных и взвешенных в воде песков; γ_w – объемный вес воды; I – градиент вертикальной фильтрации ($\Delta H/m$); σ – напряжения от веса песков, располагающихся над перекрывающей толщиной связных грунтов; σ^* – напряжение от фиктивного веса связных грунтов; H , H_n – уровни подземных вод; m – толщина перекрывающего слоя связных грунтов.



1 – толщина несвязных грунтов; 2 – свод обрушения 3 – перекрывающий слой связных грунтов; 4 – карстующиеся породы

Рис. 5 – Модель М.М. Протодяконова для связных грунтов

Пользуясь зависимостями кинематики и механизма массовой суффозии, а также решениями М.М. Протодяконова, для участков, сложенных песчаными грунтами с наличием перекрывающего слоя глинистых грунтов, можно прогнозировать развитие карстообразования по схеме, приведенной в работе [5], с учетом приведенных выше наших дополнений в следующей последовательности:

- вычисляется диаметр свода обрушения в толще несвязного грунта (см. рис. 5), образующегося из-за возникновения изгиба и нарушения сплошности перекрывающего слоя глинистого грунта вследствие возникновения полостей в карстующихся породах, используя зависимости, полученные М.М. Протодяконовым (6);

- определяется диаметр карстового провала в толще несвязных грунтов (см. рис. 3), используя зависимости кинематики и механизма массовой суффозии [5], предложенные А.В. Аникиевым;

- определяется критическая толщина $h_{зкр}$ условно устойчивого слоя грунта над разуплотненной областью по рис. 3, при которой возможно его разрушение или обрушение грунтов природного сложения по периметру условной линии $A'B'$.

По сравнению с моделью Бирбаумера, данная методика расчета (с эллиптической провальной зоной, состоящей по глубине из воронки и купола свода), в большей мере соответствует опытным данным М.М. Протодяконова [9] с влажным песком, а также аналогичным экспериментам, проведенным для сухого песка в Институте горного дела СО АН СССР под руководством Е.И. Шемякина [9], и, главное, фактическим параметрам большинства происшедших провалов с диаметрами до 20-40 м.

Недостатком данного метода является сложность его применения для участков со сложным геологическим строением (чередование слоев связных и несвязных, а порой и скальных грунтов).

С учетом недостатков рассмотренных выше расчетных схем предлагается для определения основных параметров карстовых провалов использовать численные методы, особенно в случаях большой толщины перекрывающего массива, а также при сложном геологическом строении, выполнять расчеты с применением программ конечного-элементного моделирования, и в частности, программного комплекса PLAXIS.

Программный комплекс PLAXIS позволяет определять напряженно-деформированное состояние как в грунтовом массиве, так и в конструкциях, взаимодействующих с грунтом на любой стадии их возведения в плоской и осесимметричной постановке [10].

Моделирование грунта в ПК PLAXIS осуществляется 15-узловыми или 6-узловыми треугольными элементами с применением модели Мора-Кулона. При этом могут быть использованы упругая модель, модель Хоека-Брауна, модель упрочняющегося грунта (Hardening soil model) и т.д.

Численный расчет сводится к моделированию процесса образования полости в карстующихся породах до момента потери несущей способности вышележащих слоев грунта.

В общем виде, при применении программного комплекса PLAXIS, численный расчет выполняется в следующей последовательности:

- загрузка расчетной области собственным весом грунта и определение начального напряженно-деформированного состояния грунтового массива;
- моделирование проектируемых зданий и сооружений (при их наличии);
- моделирование полости в карстующихся породах. Как правило, данная полость моделируется на кровле карстующихся пород;
- итерационное увеличение размера полости в толще карстующихся пород до момента потери несущей способности вышележащих грунтов.

Важно в процессе расчета получить именно процесс разрушения и только потом оценивать количественно и качественно зоны сдвиговых деформаций. Например, при использовании опции «поэтапное строительство» критерием наличия данного процесса может служить зависимость общих перемещений и сдвиговых деформаций от коэффициента массы (ΣM_{stage}) характерная появлением ниспадающего участка, т.е. ростом сдвиговых деформаций и общих перемещений при неизменной величине данного коэффициента (рис. 6).

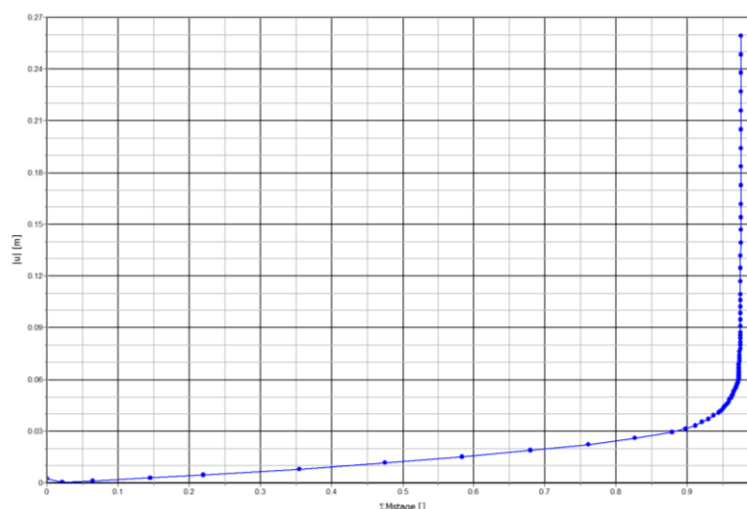


Рис. 6 – Типичный характер получаемых кривых зависимости общих перемещений и сдвиговых деформаций в зависимости от развития коэффициента массы для точек, расположенных внутри провальной зоны

За диаметр карстового провала принимается область полученных деформаций в основании фундамента проектируемых сооружений (или на поверхности рельефа), совпадающая с зоной максимальных сдвиговых деформаций, расположенных в пределах зоны сгущения так называемых «пластических точек», т.е. зоны преодоления структурной прочности грунта (рис. 7).

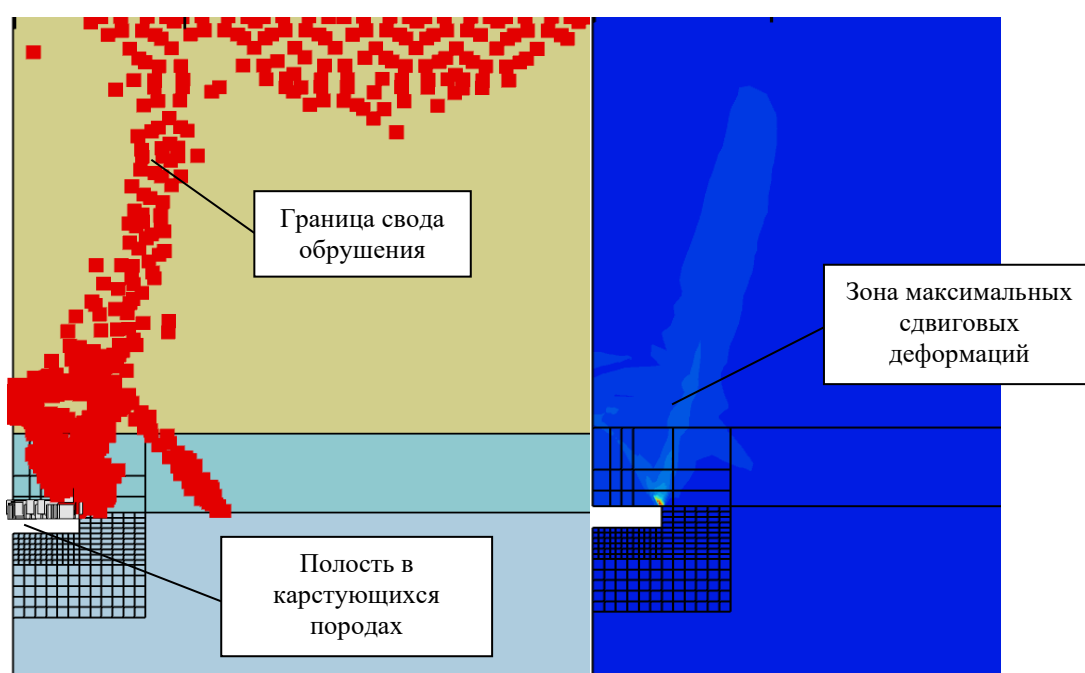


Рис. 7 – Зона максимальных сдвиговых деформаций, находящаяся в пределах области концентрации пластических точек

Предлагаемый численный метод расчета позволяет определить размеры карстового провала на участках с различными геологическим и гидрогеологическим строением грунтового массива, а также обеспечивает получение более детального очертания зоны провалообразования, что особенно актуально при сложном напластовании грунтов. Кроме этого, существует возможность более полно оценить влияние процессов провалообразования на существующие или проектируемые здания и сооружения, например, определить их дополнительные перемещения и в том числе определить возникающие в их конструкциях дополнительные усилия.

При этом, следует учитывать, что применение численных методов с использованием программных продуктов, получивших наибольшую популярность в области геомеханических расчетов (в частности, ПК PLAXIS) иногда не позволяет полностью смоделировать процесс разрушения грунтового массива. Вследствие этого, получаемая форма и размеры провалов и оседания поверхности рельефа, дополнительные перемещения зданий и сооружений могут отличаться от реально наблюдаемых и замеряемых величин.

Следует также отметить, что моделирование процессов карсто- и провалообразования, включающими в себя растворение, суффозию, образование трещин, пустот и т.д. является довольно сложной задачей даже в случае применения «тяжелых МКЭ-пакетов».

Выполненные предварительные тестовые расчеты по предлагаемой методике диаметров карстовых провалов для грунтовых условий, представленных песками толщиной слоя 9 м и подстилающими их глинами толщиной 1,5, 2,0 и 2,5 м, которые перекрывают карстующиеся известняки показали, что по предлагаемой методике численного моделирования по ПК PLAXIS диаметры карстовых провалов соответственно равны 5,5, 7,5 и 8,6 м. Аналитический метод, основанный на модели М.М. Протодяконова, с учетом механизма массовой суффозии А.В. Аникиева, дает близкие значения диаметров провалов: 6,0, 7,3 и 8,4 м.

В заключение следует отметить, что если при применении модели Бирбаумера имеется ограничение по толщине слоя перекрывающих пород, а при применении модели М.М. Протодяконова с учетом зависимости кинематики и механизма массовой суффозии – ограничение по сложности геологического строения рассматриваемых участков, то конечно-элементное моделирование не имеет рассмотренных выше ограничений, однако также имеет допущения и недостатки в связи с высокой сложностью проявления карстообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений.
2. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. -М.: НИИОСП, 1985.
3. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. –М.: Стройиздат, 1986, 176 с.: ил.
4. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. –М.: Наука, 1989, 151 с.: ил.
5. *Аникиев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии. Геоэкология, 2006 г., №6, Москва
6. *Аникиев А.В.* Об использовании модели Бирбаумера в инженерном карстоведении. Сергеевские чтения. Моделирование при решении геоэкологических задач. Выпуск 11. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23-24 марта 2009 г.). ГЕОС. Москва, 2009 г.
7. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения под общей редакцией *В.А. Ильичева*. Москва, 2014 г.
8. *Шахуняц Г.М.* Земляное полотно железных дорог. Трансжелдориздат. 1953 г.
9. *Бульчев Н.С.* Механика подземных сооружений. Издательство “Недра”, 1982 г.
10. Plaxis. Справочное руководство. Plaxis b. v. 2008 г.

Статья опубликована: ПГС. 2016, №10. С. 36-41