

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ

ЧАСТЬ I. МОДЕЛИРОВАНИЕ

SINKHOLE DEVELOPMENT MODEL

PART I. MODELING

УДК 624.131.37:551.448

DOI 10.25296/1993-5056-2017-5-40-51

**НЕЩЕТКИН О.Б.**

Директор ООО Научно-производственный центр «КАРСТ», к.г.-м.н.,
г. Дзержинск Нижегородской области, karst@sinn.ru

NESHCHETKIN O.B.

Director of Scientific Production Center "KARST", PhD (Candidate of Science in
Geology and Mineralogy), Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, karst@sinn.ru

Ключевые слова:

карст; карстовый провал; механизм образования провала;
моделирование; метод качественного подобия.

Key words:

karst; sinkhole; sinkhole development model; modeling; analogue
method.

Аннотация

В статье изложены основные результаты лабораторного моделирования карстовых провалов методом качественного подобия. Натурные и лабораторные исследования механизма образования карстовых провалов проводятся автором с 1982 г. Лабораторные исследования основаны на подборе специальных материалов, качественно отражающих деформации покровной толщи с момента обрушения кровли карстовой полости до развития провала на дневной поверхности. Было установлено, что при обрушении кровли карстовой полости в покровных грунтах формируется первая промежуточная полость, обрушение свода которой обуславливает формирование второй промежуточной полости и т.д. до развития провала на дневной поверхности.

Abstract

This paper includes the basic results of sinkhole modeling with use special analogue materials. Natural and experimental investigations of sinkhole development have been carried out since 1982. Experimental investigations are based on selection of special analogue materials. These materials have enabled to simulate the process of sinkhole development from the karst cavity roof destruction to sinkhole formation on the earth surface. It has been determined that the karst cavity roof destruction leads to the first "intermediate" cavity formation in the cover ground. Then arch destruction of the first "intermediate" cavity leads to the second "intermediate" cavity formation, etc., include sinkhole formation on the earth's surface.

Введение

Прогноз карстовой опасности для проектируемых или существующих сооружений, помимо сведений о размерах карстовых впадин, частоте образования провалов, требует выявления неблагоприятных факторов, влияющих на размеры провалов и частоту их образования, а также оценки опасности (устойчивости) выявленных карстовых полостей.

В практике инженерных изысканий в карстовых районах, как правило, большинство обнаруженных карстовых полостей признаются опасными, а площадка изысканий — непригодной для строительства.

Хорошей основой для инженерных расчетов при инженерно-геологических изысканиях на закарстованных территориях являются модели механизма провалообразования, которые позволяют оценить опасность карстовой полости, разработать геомеханическую модель расчета диаметра карстового провала и учесть влияние геолого-гидрогеологических и техногенных факторов на устойчивость карстовой полости и на размеры карстового провала.

В настоящей статье автор термином «механизм образования карстовых провалов» или «механизм провалообразования» обозначает совокупность деформаций покровной толщи над карстовой полостью, включая деформацию земной поверхности.

Исследование механизма провалообразования в природе крайне затруднено, объем натурных исследований зон провалов невелик. Значительную помощь в исследовании оказывает лабораторное физическое моделирование механизма провалообразования, которое помогает понять особенности деформаций покровной толщи, влияние геолого-гидрогеологических условий и параметров карстовой полости на вид и размеры карстового провала.

Среди лабораторных исследований механизма провалообразования можно отметить работы [1, 2, 6, 8–11], содержащие разнообразные модели механизма образования карстовых провалов.

Большинство расчетных схем для определения размера карстового провала основано на решении уравнения предельного равновесия круглоцилиндрического столба грунта над карстовой полостью: $P = F + C$, где P — вес круглоцилиндрического столба грунта над карстовой полостью; F и C — силы трения и сцепления по поверхности этого столба [7, 8].

Вместе с тем из результатов исследований морфологии карстовых впадин известно, что в пределах в целом однородного по геологическому строению участка можно наблюдать карстовые провалы разнообразных размеров и видов, объяснить которые моделью предельного равновесия круглоцилиндрического столба грунта не представляется возможным. Раскопки провалов, зондирование провалов и детальные буровые работы в зонах провалов также не подтверждают сдвигание круглоцилиндрического столба грунта.

Для установления механизма деформаций грунтов над карстовыми полостями автором проведены лабораторные и натурные исследования [3, 4, 12], на основе которых сформулирована модель механизма образования карстовых провалов.

Результаты этих исследований планируется опубликовать тремя частями в связи со значительным объемом фактического материала и иллюстраций. В части 1 приведены основные результаты лабораторного моделирования, в части 2 планируется показать результаты раскопок

провалов, зондирования и бурения в зонах провалов, часть 3 включает модель механизма образования карстовых провалов, расчетную схему определения диаметра карстового провала.

Методика моделирования

Целью лабораторных исследований являлось наблюдение на моделях механизма деформации покровных грунтов от обрушения кровли карстовой полости до формирования провала на дневной поверхности.

Для обеспечения возможности наблюдения за деформациями покровных грунтов над карстовой полостью и развитием карстового провала на дневной поверхности, а также неоднократного воспроизводства экспериментов автором в 1985–1989 гг. был разработан метод качественного подбора для моделирования механизма образования провала, сконструирован стенд в виде вертикального шелевого лотка и выполнено более 130 экспериментов.

Метод качественного подбора базируется на теории горного давления М.М. Протодяконова [5], из которой следует, что при обрушении кровли полости в покровной толще происходит обрушение грунта с формированием свода равновесия.

Физической основой метода качественного подбора является подбор материалов, которые способны деформироваться в модели и качественно отражать деформации грунтов, сходные с природным провалообразованием, которые наблюдались автором и другими исследователями при изучении карстовых провалов в природных условиях.

Исследования провалов *in situ* позволили автору сделать вывод, подтвержденный раскопками провалов, что выход провала на дневную поверхность — это обрушение свода промежуточной полости.

Таким образом, модельный материал, имитирующий глинистые и необводненные песчаные грунты, должен обладать такими свойствами, которые обуславливали бы формирование промежуточных полостей и обрушение их сводов при моделировании провалообразования в лабораторных условиях с учетом параметров сконструированного стенда.

Подобранные автором модельные материалы позволили наблюдать в экспериментах полный цикл провалообразования с момента нарушения устойчивости кровли карстовой полости до развития провала на дневной поверхности.

Природные водонасыщенные пески моделировались сухим просеянным песком (0,25–0,50 мм) светло-желтого и коричневого цветов (светлые и серые слои на фотографиях). Этот материал успешно использовался многими исследователями [10, 11], поскольку сухой песок является лучшим лабораторным материалом для моделирования природного водонасыщенного песка, так как обладает минимальным сцеплением и прекрасно отображает деформации водонасыщенного песка в природных условиях при образовании карстового провала.

Для моделирования глинистых грунтов и необводненных песчаных грунтов автором был выбран тонкодисперсный материал — алебастр (основной), цемент, глинопоршок. Вариации плотности и сцепления такого модельного грунта обеспечивались за счет различных смесей сухого песка и тонкодисперсного материала и разной степени уплотнения.

Алебастр (или другой тонкодисперсный материал) в разной степени уплотнения и в разнообразных смесях с сухим песком хорошо моделирует глинистые грунты, гли-

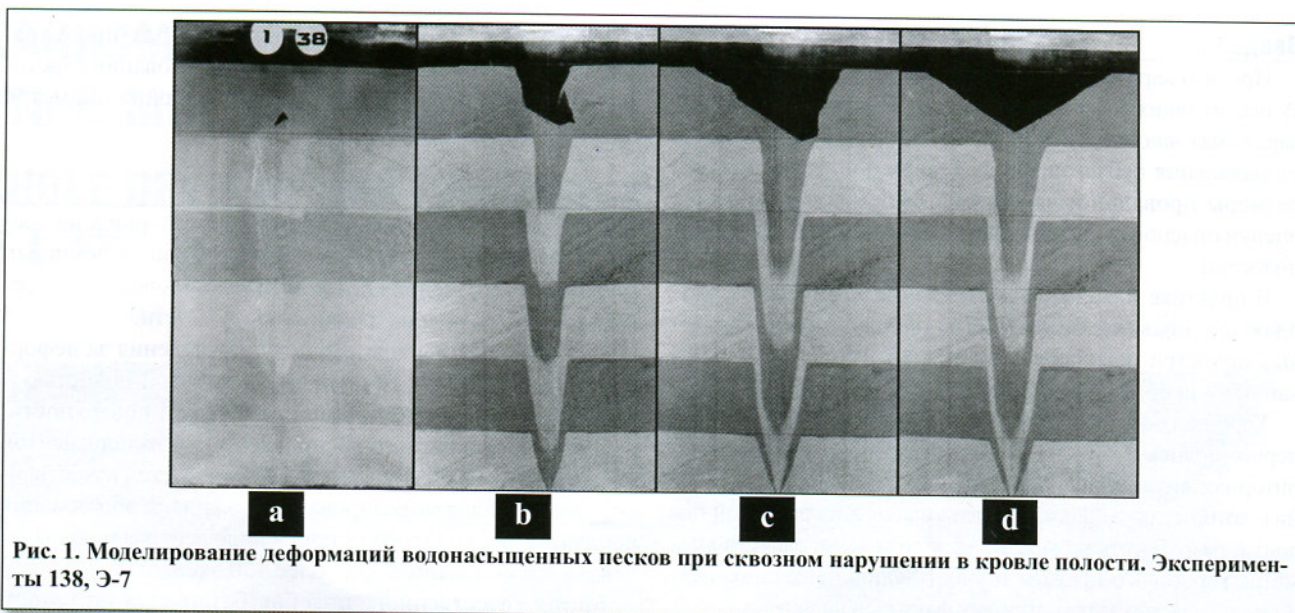


Рис. 1. Моделирование деформаций водонасыщенных песков при сквозном нарушении в кровле полости. Эксперименты 138, Э-7

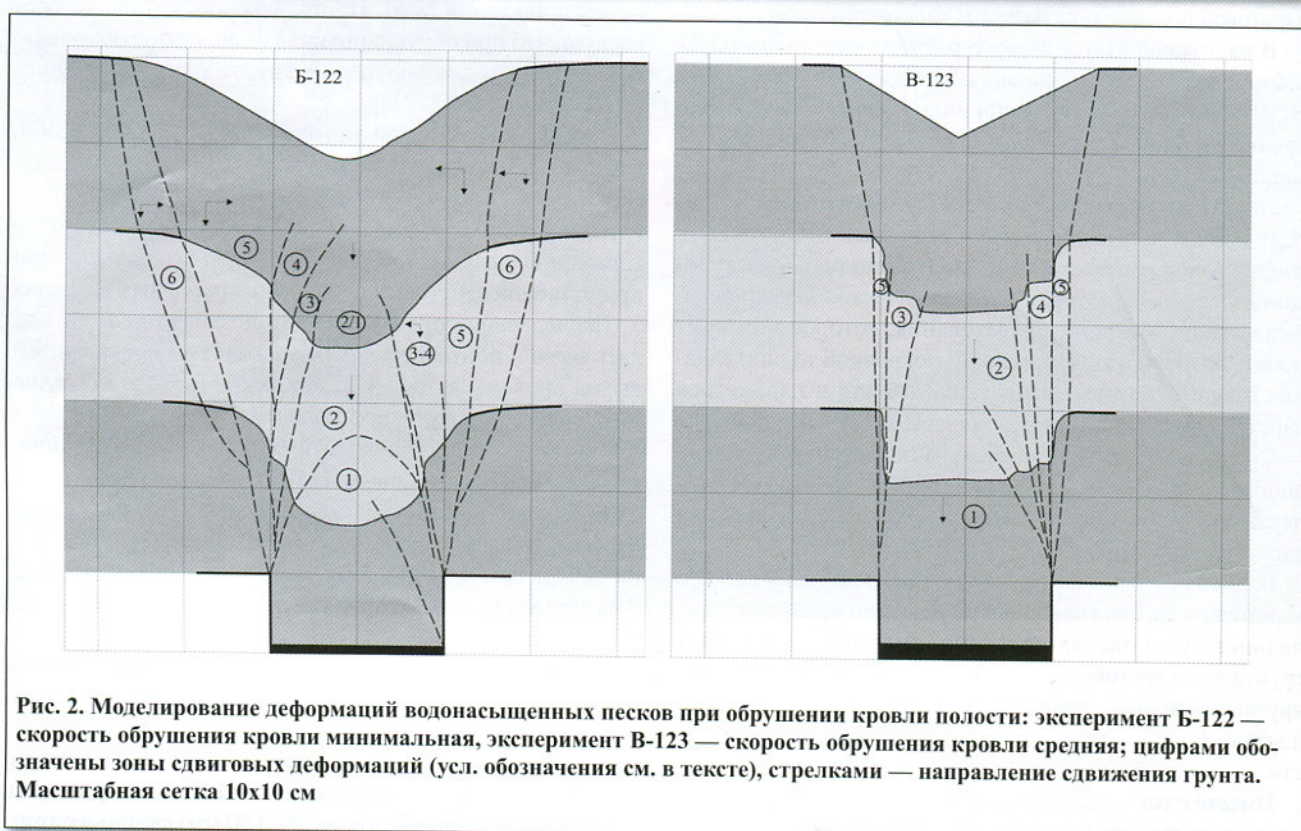


Рис. 2. Моделирование деформаций водонасыщенных песков при обрушении кровли полости: эксперимент B-122 — скорость обрушения кровли минимальная, эксперимент B-123 — скорость обрушения кровли средняя; цифрами обозначены зоны сдвиговых деформаций (усл. обозначения см. в тексте), стрелками — направление сдвижения грунта. Масштабная сетка 10x10 см

нистые пески, влажные пески, глинистые прослои в водонасыщенных песках и т.п. Такие смеси в лабораторном моделировании деформаций грунтов, по мнению автора, могут также успешно применяться для исследований устойчивости природных откосов, стенок котлованов, сложенных слоистыми грунтами.

Вертикальный стенд с шириной рабочей части 2,5 см обеспечивался дополнительными прокладками из силикатного стекла для уменьшения трения по стенкам стенда, а также армировался для уменьшения распора стенок при уплотнении модельного материала. Обрушение кровли полости осуществлялось сдвижением вниз плоской потолочины заданного размера на заданную глубину, что и определяло объем полости.

В лабораторных экспериментах моделировались два основных вида потери устойчивости карстовой полости:

— обрушение кровли полости;

— образование сквозного нарушения в кровле полости.

Обрушение кровли карстовой полости выполнялось с различными скоростями, часть экспериментов проведена с дополнительной внешней нагрузкой на дневную поверхность. Различная скорость обрушения кровли карстовой полости моделировалась путем изменения скорости сдвижения потолочины, имитирующей кровлю полости.

Соотношение ширины полости и мощности покровных грунтов изучалось в пределах от 1/12 до 4/1, при этом ширина полости в модели составляла от 5 до 40 см при высоте полости 8 см, а мощность покровных грунтов — от 10 до 60 см. Эксперименты фотодокументировались, и/или выполнялась прорисовка результатов эксперимента на кальку.

Выполненный объем моделирования позволил получить оригинальные данные об особенностях деформаций грунтов, а также выявить и изучить формирование и развитие промежуточных полостей и сводовых обрушений,

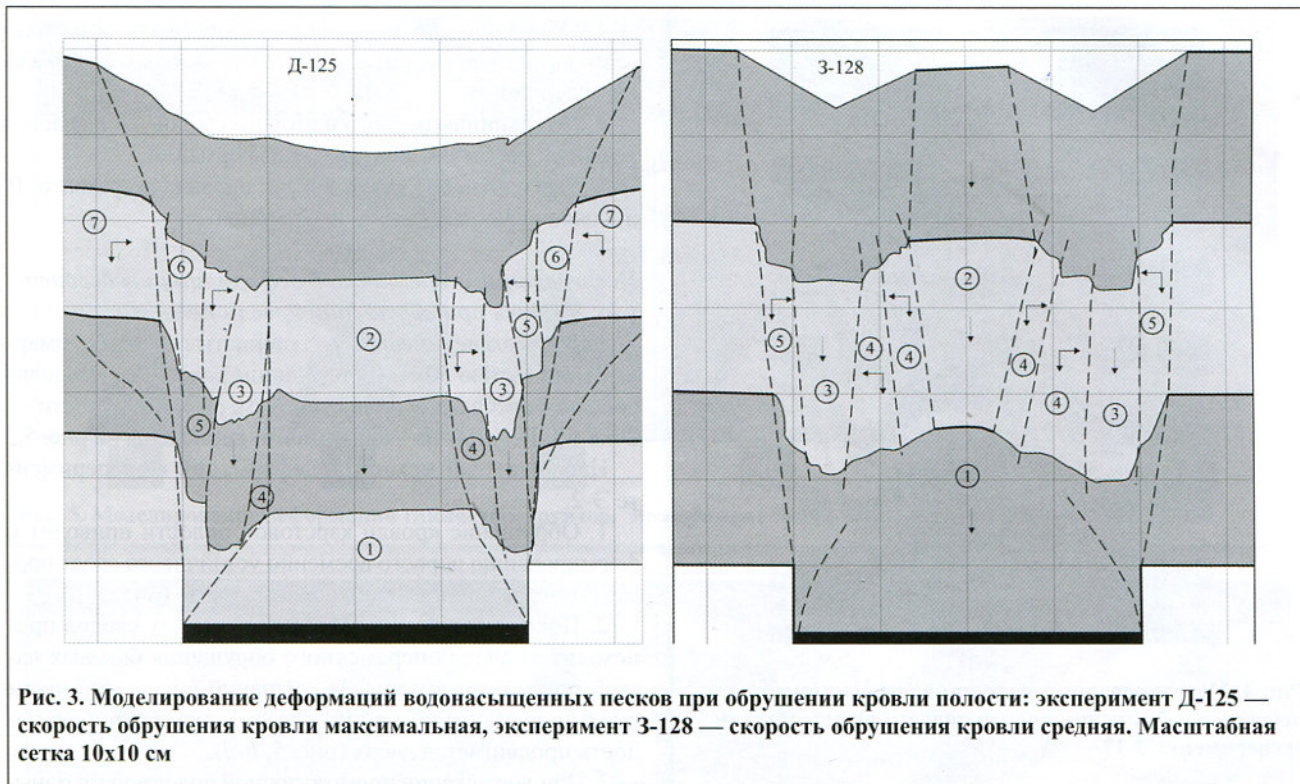


Рис. 3. Моделирование деформаций водонасыщенных песков при обрушении кровли полости: эксперимент Д-125 — скорость обрушения кровли максимальная, эксперимент 3-128 — скорость обрушения кровли средняя. Масштабная сетка 10x10 см

появление и развитие провалов на дневной поверхности, особенности деформации водонасыщенной среды при различных скоростях обрушения кровли полости и при образовании сквозного нарушения.

Результаты моделирования в вертикальном стенде

Деформация водонасыщенных песков при образовании сквозного нарушения в кровле полости

Условия экспериментов 138, Э-7: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; ширина сквозного нарушения (щель) — 0,2 см; размеры полости — 20x8 см (ширина x высота). Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

Наблюдаемый механизм деформаций в экспериментах 138, Э-7.

1. При образовании сквозного нарушения в кровле полости после короткой паузы в покровном массиве возникает небольшая промежуточная полость, которая очень быстро продвигается вверх и достигает дневной поверхности, форма полости — сводовая, с «острой» замковой частью (рис. 1, а).

2. На дневной поверхности начинает развиваться коническая воронка, иногда с дискретными обрушениями бортов (рис. 1, б–д).

3. Зона сдвижения песков характеризуется бокаловидной формой и имеет четко выраженные особенности: в центральной части зоны частицы грунта передвигаются вниз практически одновременно и параллельно, а в краевых частях зоны сдвижения частицы грунта передвигаются последовательно, скорость передвижения частиц, залегающих ближе к оси зоны сдвижения, выше скорости передвижения периферийных частиц.

Деформация водонасыщенных песков при обрушении кровли полости

Условия эксперимента Б-122: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 20 см)

моделировались сухим песком без уплотнения; размеры полости — 20x8 см; скорость обрушения кровли полости минимальная.

Условия эксперимента В-123: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 20 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размеры полости — 20x8 см; скорость обрушения кровли полости средняя. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Б-122.

1. Деформация грунтов происходит практически одновременно, но маркирующие разноцветные слои позволяют в итоговой картине выделить несколько зон *последовательных сводовых деформаций*, направление сдвижения грунта на рисунке 2 показано стрелками, зоны обозначены цифрами.

Зона 1 — вертикальное сдвижение в виде первого свода.

Зона 2 — вертикальное сдвижение в виде второго свода.

Зона 2/1 — вертикальное сдвижение в виде квазицилиндрического столба грунта (третий очень крутой вытянутый свод) в замковой части второго свода и начало развития деформаций на дневной поверхности.

Зоны 3, 4 — зоны последовательного сводового сдвижения — преимущественно вертикального и частично горизонтального (по направлению к оси провала).

Зона 5 — горизонтальное и вертикальное сдвижения, расширение общей зоны деформаций на дневной поверхности.

Зона 6 — зона преимущественно горизонтального сдвижения, завершение деформаций на дневной поверхности.

2. Наблюдается частичное уплотнение песка в зоне деформаций, ширина зоны деформаций на дневной поверхности значительно превышает ширину полости.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте В-123: последовательное сводовое обрушение, схожее с экспериментом Б-122, ширина зоны деформации незначительно превышает ширину полости, в зоне деформации незначительное разуплотнение песка.

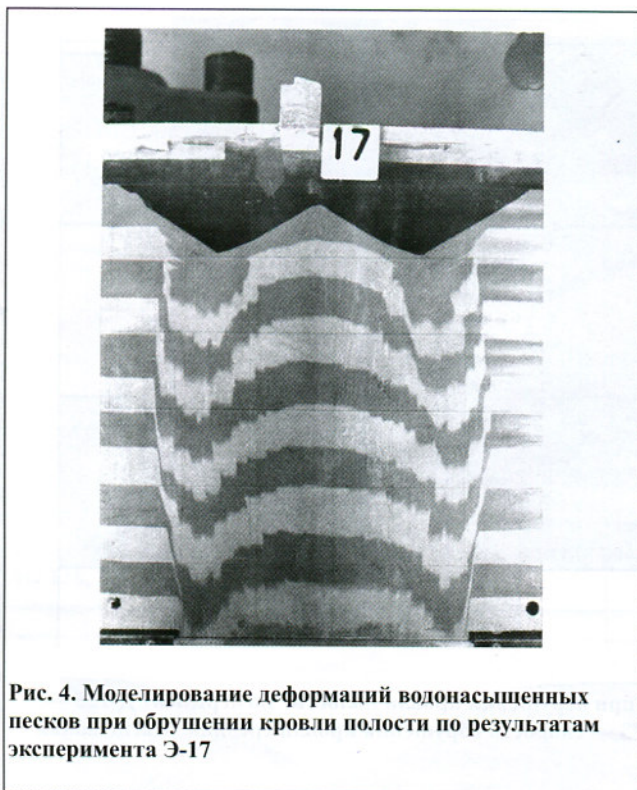


Рис. 4. Моделирование деформаций водонасыщенных песков при обрушении кровли полости по результатам эксперимента Э-17

Условия эксперимента Д-125: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 15 см) моделировались сухим песком без уплотнения; размеры полости — 40x8 см; скорость обрушения кровли полости максимальная.

Условия эксперимента З-128: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 20 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размеры полости — 40x8 см; скорость обрушения кровли полости средняя.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Д-125.

1. Обрушение первого свода (зона 1) и крутого второго свода (зона 2) с выходом деформаций на поверхность.

2. Деформации в краевых частях — вертикальные (зона 3), в стороны от оси (зона 4) и в сторону к оси (зона 5) провала.

3. Расширение зоны деформации за счет сдвижения песков к центру (зона 6) и разуплотнения (зона 7).

4. В провале и вокруг него наблюдается разуплотнение песка.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте З-128.

1. Схожие деформации, как в предыдущем эксперименте, отсутствует зона разуплотнения 6 и 7.

2. Отчетливо видно, что зона 3 — это зона специфических сводовых деформаций по границе первого свода обрушения (зона 1).

3. Разуплотнение вокруг провала не развито. В провале наблюдается разуплотнение песка.

Условия эксперимента Э-17: водонасыщенные пески суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 5 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размеры полости — 40x8 см; скорость обрушения кровли максимальная. Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Э-17.

1. Обрушение первого свода и второго крутого свода (дополнительно см. рис. 3) обуславливает выход провала на поверхность.

2. По границам первого и второго сводов наблюдается развитие необычных сводовых деформаций.

3. Разуплотнение песка вокруг провала не развито. В провале наблюдается разуплотнение песка.

Исследование особенностей деформаций неоднородных грунтов при обрушении кровли полости

Условия эксперимента Э-2: глинистые грунты суммарной мощностью 50 см (при толщине слоя 10 см) моделировались алебастром с уплотнением; размеры полости — 20x8 см. Результаты эксперимента приведены на рис. 5.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Э-2.

1. Обрушение кровли карстовой полости приводит к формированию первого временно устойчивого свода промежуточной полости в покровном грунте (рис. 5, а).

2. Последовательное образование новых сводов происходит за счет попеременного обрушения боковых частей после незначительных осыпаний в замковой части предыдущего свода, таким образом, промежуточная полость продвигается вверх (рис. 5, b-d).

3. При достижении промежуточной полостью глубины, соизмеримой с шириной ее основания, начинается деформация поверхности массива в виде слабоамплитудного прогиба, вокруг которого развиваются трещины (рис. 5, e).

4. Деформация завершается образованием провала на дневной поверхности, вокруг которого развиваются трещины и зона разуплотнения грунта (рис. 5, f).

Условия эксперимента Э-1: глинистые грунты суммарной мощностью 50 см (при толщине слоя 10 см) моделировались алебастром без уплотнения; размеры полости — 20x8 см. Результаты эксперимента приведены на рис. 6.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Э-1.

1. Вслед за обрушением кровли полости происходит последовательное сводовое обрушение грунта с формированием первого временно устойчивого свода (рис. 6, а).

2. За счет последовательно попеременного обрушения боковых частей свода происходит формирование следующего временно устойчивого свода на меньшей глубине (рис. 6, b) и образование на дневной поверхности локального прогиба небольшой амплитуды с опоясывающими трещинами (рис. 6, c).

3. Далее происходит обрушение замковой части свода и выход провала на дневную поверхность (рис. 6, d).

4. Завершаются деформации обрушением нависающих блоков грунта и образованием провала временно устойчивой формы (рис. 6, e). Вокруг провала наблюдаются трещины, затем происходит развитие провала до устойчивой формы (воронка коническая) с развитием вокруг провала трещин и зоны оседания грунта (рис. 6, f).

Условия эксперимента Э-16: песчаные неоднородные грунты суммарной мощностью 60 см (при толщине слоя 10 см) моделировались смесью алебаstra и сухого песка в соотношении 1:1 без уплотнения; размеры полости — 20x8 см. Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

Наблюдаемый механизм деформаций в эксперименте Э-16.

1. При обрушении кровли полости происходит очень быстрое последовательное обрушение сводов промежуточных полостей.

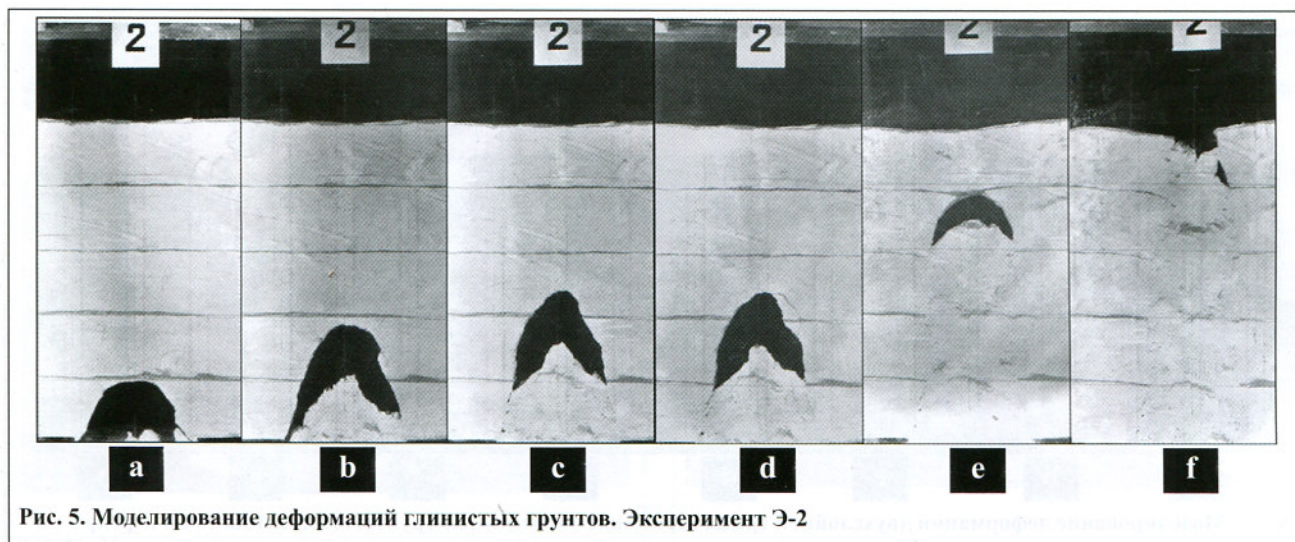


Рис. 5. Моделирование деформаций глинистых грунтов. Эксперимент Э-2

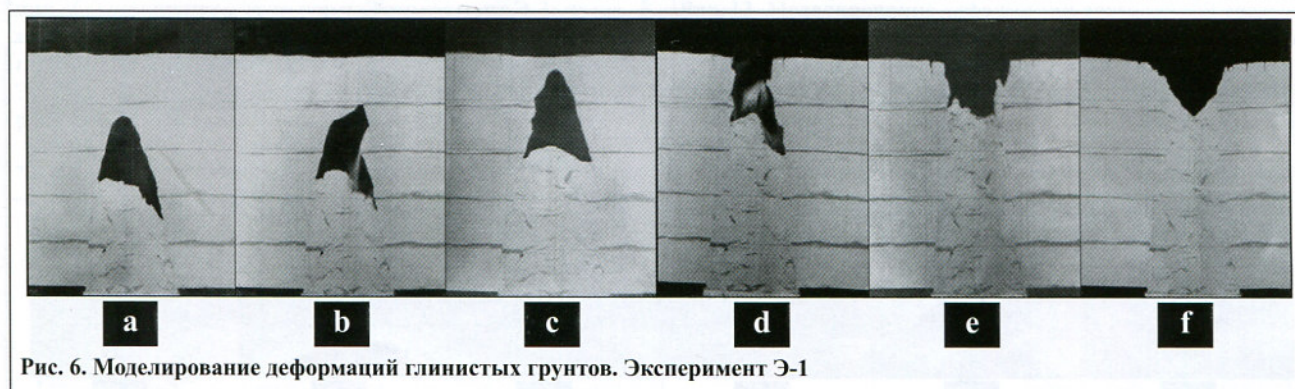


Рис. 6. Моделирование деформаций глинистых грунтов. Эксперимент Э-1

2. Деформации дневной поверхности и образование провала аналогичны предыдущим экспериментам (см. рис. 5, 6). При уменьшении высоты полости до 2 см и ширине полости 10, 20, 40 см провал не вышел на поверхность.

Исследование особенностей деформаций двухслойной среды: водонасыщенных песков и необводненных глинистых грунтов при образовании в кровле полости сквозного нарушения

Условия экспериментов Э-8, Э-9, Э-10. Э-8: глинистые грунты мощностью 10 см моделировались алебастром без уплотнения, водонасыщенные пески суммарной мощностью 50 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размер полости 20x8 см, щель — 0,2 см. Э-9: глинистые грунты суммарной мощностью 20 см (при толщине слоя 10 см) моделировались алебастром без уплотнения, водонасыщенные пески суммарной мощностью 40 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размер полости 20x8 см, щель — 0,2 см. Э-10: глинистые грунты суммарной мощностью 30 см (при толщине слоя 10 см) моделировались алебастром без уплотнения, водонасыщенные пески суммарной мощностью 30 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размер полости 20x8 см, щель — 0,2 см. Результаты экспериментов приведены на рис. 8–10.

Наблюдаемый механизм деформаций в экспериментах Э-8, Э-9, Э-10.

1. Истечение песка в полость через сквозное нарушение в кровле приводит к формированию небольшой полости в толще песков (рис. 9, а), а затем конической полости на границе песка и алебастра (рис. 8, с; 9, с; 10, с).



Рис. 7. Моделирование деформаций песчаных необводненных грунтов. Эксперимент Э-16

2. Рост конической полости в песках приводит к обрушению алебастра и формированию промежуточной полости в толще алебастра (рис. 8, с; 9, с; 10, с-d).

3. При мощности слоя алебастра 10 см последовательное развитие свода приводит к деформации дневной поверхности, масса обрушившегося алебастра продолжает сдвигаться одновременно с песком, что приводит к образованию провала с вертикальными стенками (рис. 8, e-g), обрушение этих стенок завершает формирование конической воронки (рис. 8, h).

4. При мощности слоя алебастра 20 см в замковой части свода промежуточной полости за счет осыпаний образуется еще один более крутой свод, вызывающий про-

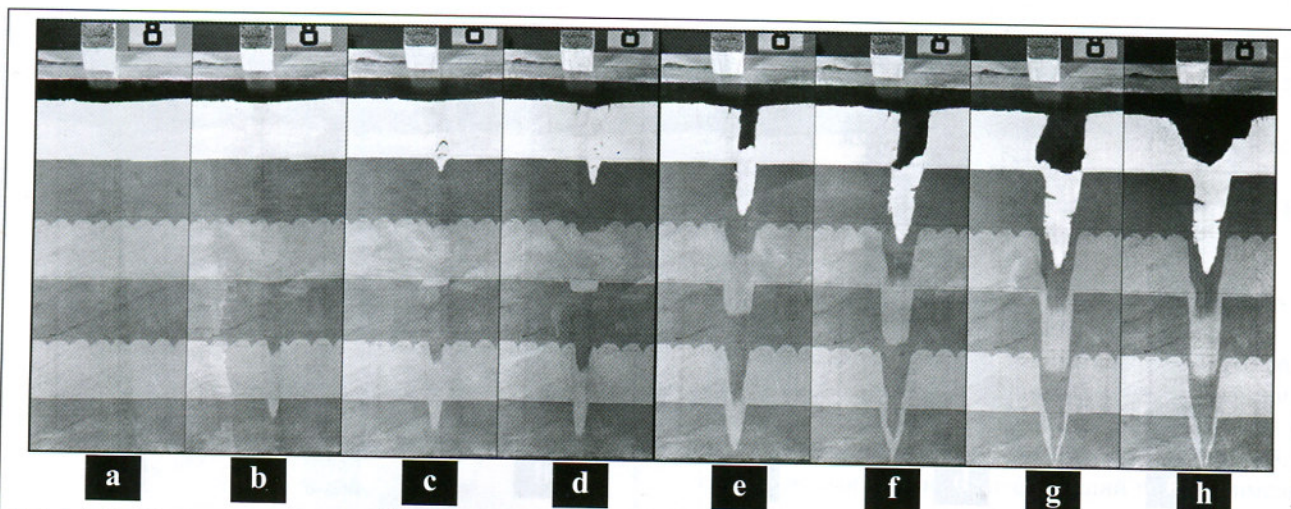


Рис. 8. Моделирование деформаций двухслойной среды (песчаные обводненные грунты мощностью 50 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 10 см) при образовании сквозного нарушения в кровле полости. Эксперимент Э-8

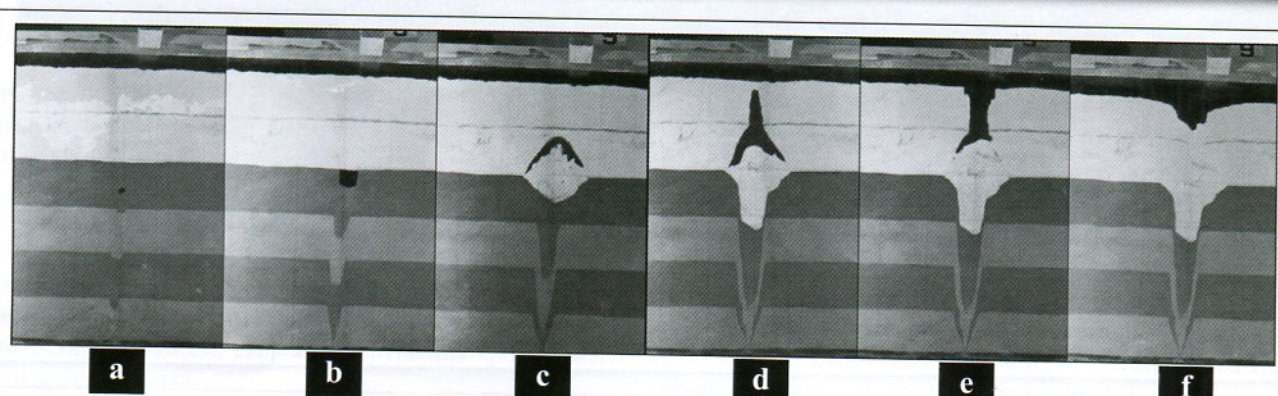


Рис. 9. Моделирование деформаций двухслойной среды (песчаные обводненные грунты мощностью 40 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 20 см) при образовании сквозного нарушения в кровле полости. Эксперимент Э-9

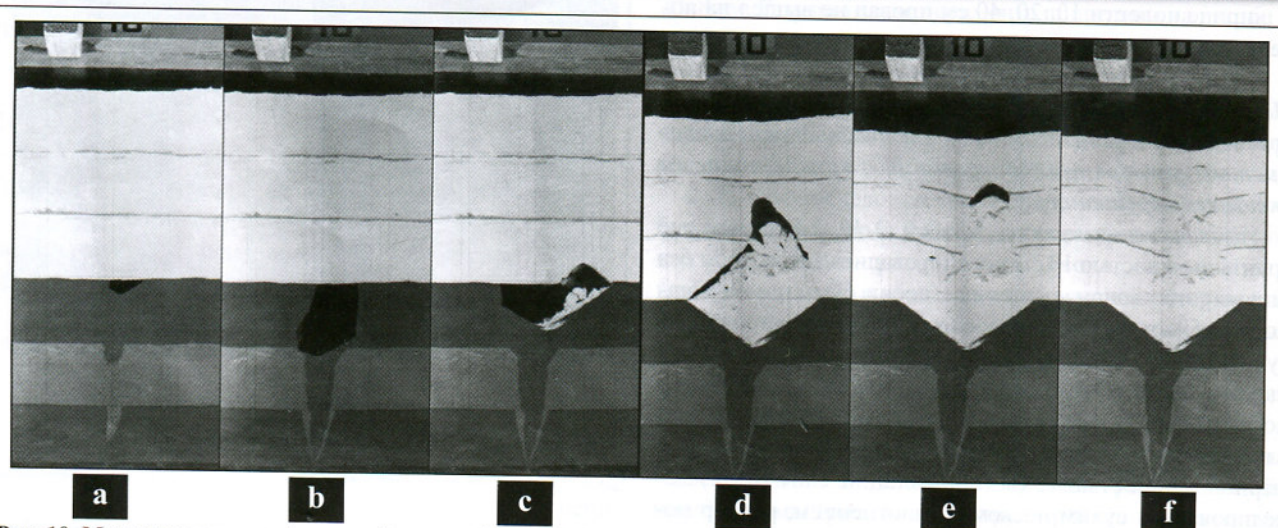


Рис. 10. Моделирование деформаций двухслойной среды (песчаные обводненные грунты мощностью 30 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 30 см) при образовании сквозного нарушения в кровле полости. Эксперимент Э-10

гибание дневной поверхности с образованием незначительных трещин (рис. 9, d).

5. Далее происходит обрушение и развитие провала до конической воронки, вокруг которой формируется зона ослабленных грунтов с трещинами отрыва (рис. 9, e-f).

6. При мощности слоя алебаstra 30 см в песках в основании толщи алебаstra образуется более широкая коническая полость, что обуславливает формирование в алебастре промежуточной полости с широким основани-

ем (рис. 10, c-d). Обрушение алебаstra происходит с видимым разуплотнением, что обуславливает уменьшение объема промежуточной полости и заполнение ее материалом обрушения (рис. 10, e), поэтому на поверхности образуется локальное оседание (рис. 10, f).

Исследование особенностей деформаций двухслойной среды: водонасыщенных песков и необводненных глинистых грунтов при обрушении кровли полости

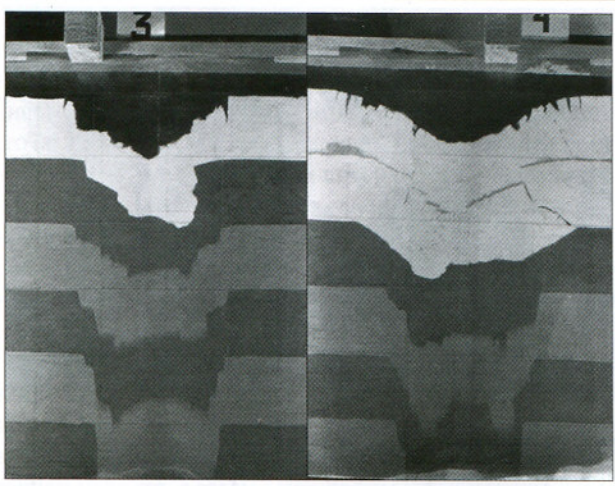


Рис. 11. Моделирование деформаций двухслойной среды при обрушении кровли полости. Эксперимент Э-3: песчаные обводненные грунты мощностью 50 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 10 см. Эксперимент Э-4: песчаные обводненные грунты мощностью 40 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 20 см

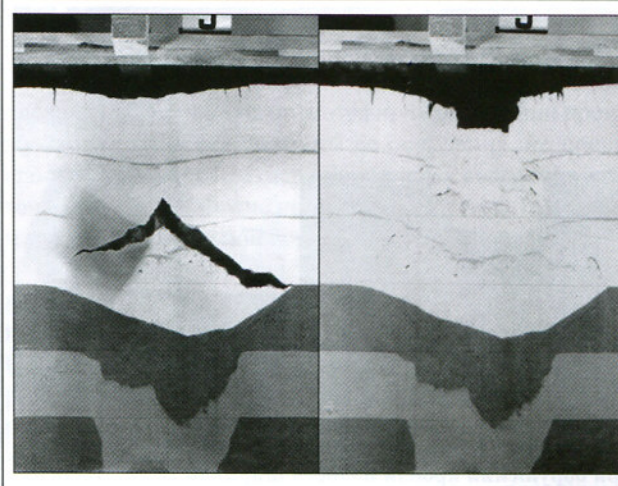


Рис. 12. Моделирование деформаций двухслойной среды при обрушении кровли полости. Эксперимент Э-5: песчаные обводненные грунты мощностью 30 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 30 см

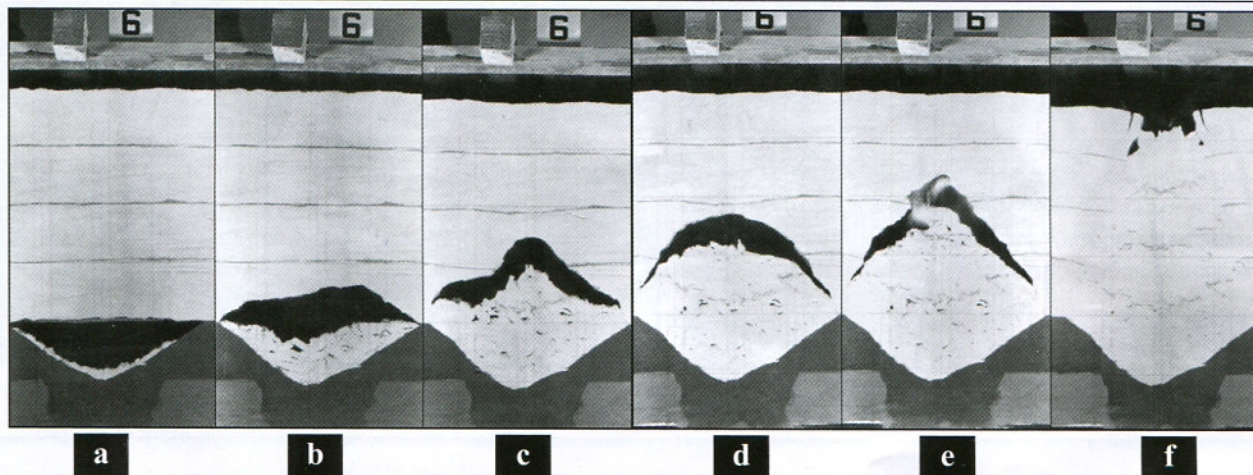


Рис. 13. Моделирование деформаций двухслойной среды при обрушении кровли полости. Эксперимент Э-6: песчаные обводненные грунты мощностью 20 см перекрыты глинистыми грунтами мощностью 40 см

Условия экспериментов Э-3, Э-4, Э-5, Э-6: глинистые грунты суммарной мощностью от 10 до 40 см (при толщине слоя 10 см) моделировались алебастром без уплотнения, водонасыщенные пески суммарной мощностью от 50 до 20 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размер полости 20x8 см; скорость обрушения кровли максимальная. Результаты экспериментов приведены на рис. 11–13.

Наблюдаемый механизм деформаций в экспериментах Э-3, Э-4, Э-5, Э-6.

1. Быстрое обрушение кровли полости приводит к характерному, описанному выше, обрушению песков с формированием промежуточной конической полости в песках в подошве слоя алебастра (рис. 13, а).

2. В эту коническую промежуточную полость начинается последовательное сводовое обрушение алебастра с развитием провала и трещин вокруг него (рис. 12).

3. В зависимости от мощности слоя алебастра образование провала на дневной поверхности происходит практически одновременно с деформацией сухого песка (рис. 11) или сразу после формирования промежуточной

полости (рис. 12). При достаточной мощности слоя алебастра в нем формируется вторая промежуточная полость, развивающаяся вверх за счет последовательных сводовых обрушений (рис. 13, с-е), а затем происходит образование провала (рис. 13, ф).

4. Деформации дневной поверхности начинаются с прогибания над замковой частью свода, затем происходит обрушение замковой части, сводовое обрушение толщи алебастра и образование провала на дневной поверхности.

Исследование особенностей деформаций двухслойной среды: водонасыщенных песков и необводненных песков при обрушении кровли полости

Условия экспериментов Э-14, Э-15, Э-18, Э-19: песчаные необводненные грунты суммарной мощностью от 20 до 40 см (при толщине слоя 10 см) моделировались смесью алебастра и сухого песка в пропорции 1:1 без уплотнения, водонасыщенные пески суммарной мощностью от 40 до 20 см (при толщине слоя 10 см) моделировались сухим песком с уплотнением; размеры полости 20x8 см и 40x8 см; скорость обрушения кровли

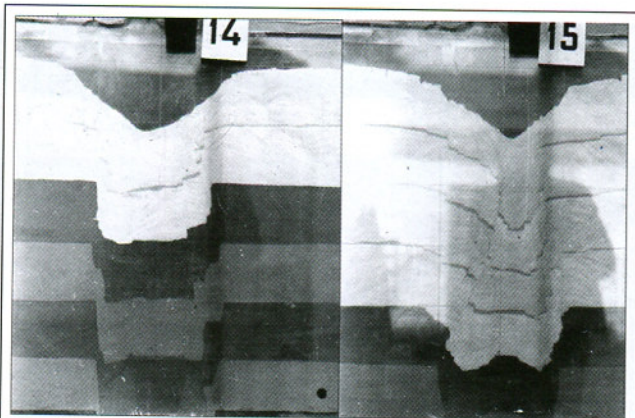


Рис. 14. Моделирование деформаций двухслойной среды при обрушении кровли полости шириной 20 см. Эксперимент Э-14: песчаные обводненные грунты мощностью 40 см перекрыты необводненными песчаными грунтами мощностью 20 см. Эксперимент Э-15: песчаные обводненные грунты мощностью 20 см перекрыты необводненными песчаными грунтами мощностью 40 см

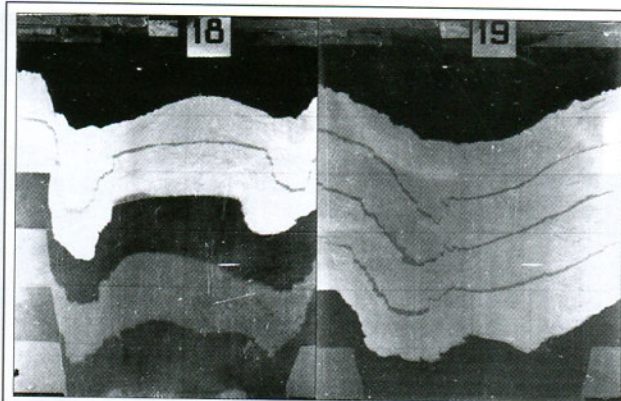


Рис. 15. Моделирование деформаций двухслойной среды при обрушении кровли полости шириной 40 см. Эксперимент Э-18: песчаные обводненные грунты мощностью 40 см перекрыты необводненными песчаными грунтами мощностью 20 см. Эксперимент Э-19: песчаные обводненные грунты мощностью 20 см перекрыты необводненными песчаными грунтами мощностью 40 см

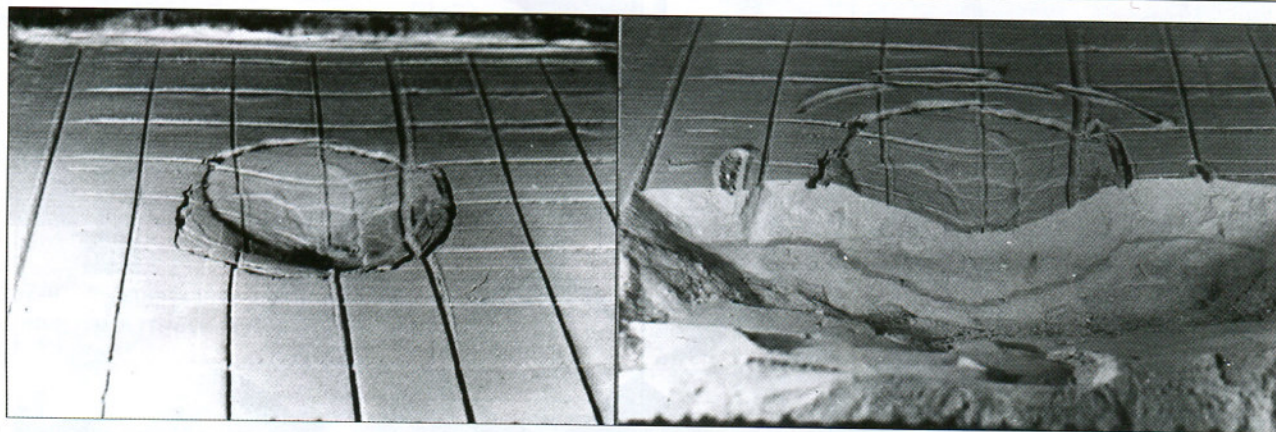


Рис. 16. Результаты моделирования провала на объемном стенде. Масштабная сетка 10x10 см

максимальная. Результаты экспериментов приведены на рис. 14–15.

Наблюдаемый механизм деформаций в экспериментах Э-14, Э-15, Э-18, Э-19.

1. Быстрое сводовое обрушение грунтов в обоих слоях приводит к формированию конической воронки (рис. 14, Э-14).

2. Деформации водонасыщенных песков схожи с предыдущими экспериментами, деформации необводненных грунтов — быстрое сводообразование, выход на поверхность иногда «узким хоботом» (рис. 14, Э-15), боковые деформации приводят к формированию конической воронки с широкой зоной сдвига грунтов вокруг нее.

3. Иногда при широкой полости происходит образование провала сложной формы (рис. 15).

Результаты моделирования на объемном стенде

Условия эксперимента: объемная модель, необводненные песчаные грунты мощностью слоя 20 см моделировались смесью алебастра с сухим песком в пропорции 1:1 без уплотнения; обводненные пески суммарной мощностью 40 см моделировались сухим песком с уплотнением; размер полости — 20x20x8 см. Результаты эксперимента приведены на рис. 16.

Наблюдаемый механизм деформаций на объемном стенде: на дневной поверхности образовался характерного облика провал, осложненный слабоамплитудными ступенями и трещинами. Механизм деформаций схож с наблюдаемыми деформациями на вертикальном плоском стенде.

Заключение

1. Моделирование механизма образования провалов с использованием материалов, деформации которых качественно подобны деформациям природных песчаных и глинистых грунтов, является, по мнению автора, наиболее эффективным методом лабораторного моделирования.

2. Подобранные материалы и вертикальный щелевой стенд обеспечивают наглядный результат в моделировании провалообразования в широком диапазоне условий сложения и обводненности природных песчаных и глинистых грунтов.

3. Метод качественного подобию в моделировании является перспективным для изучения взаимодействия сооружения с карстовым провалом, а также для исследований устойчивости склонов, бортов открытых горных выработок и т.п.

4. По результатам моделирования установлено, что механизм образования карстовых провалов в необводнен-

ных грунтах после обрушения кровли карстовой полости представляет собой последовательное сводовое обрушение покровных грунтов с образованием временно устойчивого свода промежуточной полости и последующим его обрушением, обуславливающим продвижение промежуточной полости к дневной поверхности и формирование провальной воронки. Разрушение свода промежуточной полости начинается в замковой части, а затем обрушиваются боковые части первичного свода с формированием второго свода на новой, более близкой к дневной поверхности, глубине.

5. Деформации водонасыщенных песков при образовании сквозного нарушения в кровле карстовой полости происходят в виде истечения песка в полость с формированием в водонасыщенной толще небольшой промежуточной полости, а затем зоны деформаций бокаловидной формы. На уровне залегания грунтовых вод или на границе с глинистыми грунтами в водонасыщенных песках формируется промежуточная полость в виде конической воронки с основанием, обращенным вверх. Далее в покровной толще необводненных грунтов развиваются деформации по п. 4.

6. Деформация водонасыщенных песков при обрушении кровли полости начинается формированием первого свода обрушения, в замковой части которого практически одновременно образуется второй очень крутой свод, выходящий на поверхность водонасыщенных песков. В зависимости от скорости обрушения кровли полости по границе первого и второго сводов формируются дополнительные зоны деформаций. Общая зона деформаций имеет форму бочонка, а на поверхности водонасыщенных песков образуется воронка (промежуточная полость) в целом конической формы. Далее в покровной


толще необводненных грунтов развиваются деформации по п. 4.

7. Деформации дневной поверхности с образованием провальной воронки начинаются при достижении промежуточной полостью глубины ее основания, не превышающей двух-трех размеров основания свода промежуточной полости. Можно выделить несколько стадий формирования провальной воронки.

На первой стадии над замковой частью свода промежуточной полости происходит прогибание или проседание дневной поверхности, сопровождающееся образованием кольцевых трещин. Иногда замковая часть свода разрушается таким образом, что промежуточная полость соединяется с дневной поверхностью каналом небольшого диаметра.

Вторая стадия образования провала — разрушение свода промежуточной полости в результате обрушения блоков пород, ограниченных сводовыми поверхностями. В зависимости от сцепления и плотности сложения грунтов провал приобретает сводовую, цилиндрическую, чащеобразную или коническую форму.

8. При движении промежуточной полости в толще необводненных грунтов общая зона деформаций сужается, а с момента выхода промежуточной полости на дневную поверхность общая зона деформации необводненных грунтов расширяется.

Анализ результатов моделирования сопровождался исследованием особенностей строения карстовых провалов в природных условиях, что неизбежно нашло свое отражение в интерпретации данных моделирования. Результаты исследования карстовых провалов в натуральных условиях и сопоставление с результатами лабораторного моделирования будут изложены в последующих публикациях. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Провалы и оседание земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2014. 47 с.
2. *Крашенинников В.С., Хоменко В.П.* Изменение гранулометрического состава несвязных грунтов, предшествующее карстово-суффозионному провалообразованию // *Инженерная геология*. 2017. № 2. С. 52–62.
3. *Нещеткин О.Б.* Вопросы механизма образования карстовых провалов в песках // *Изучение свойств массивов пород и геологических процессов*. М.: Наука, 1986. С. 87–94.
4. *Нещеткин О.Б.* Механизм некоторых типов карстовых провалов и инженерно-геологическая оценка их опасности: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1990. 24 с.
5. *Протодьяконов М.М.* Давление горных пород и рудничное крепление. Часть 1. Давление горных пород. М.: Гостехиздат, 1930, 94 с.
6. Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов. ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1984. 48 с.
7. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. М.: НИИОСП, 1985. 78 с.
8. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
9. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.
10. *Jannings J.E.* Building on dolomites in the Transvaal // *The Civil Engineer in South Africa*. 1966. February. P. 41–61.
11. *Fenk Y.* Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge // *Freiberger Forschungshefte*. Freiberg, 1981. 140 s.
12. *Neshchetkin O.B.* Sinkhole development models for the covered sulphate karst conditions // *Proceedings Eighth International Congress International Association for Engineering Geology and the Environment*. Vancouver, Canada. Rotterdam: Balkema, 1998. С. 2185–2192.