АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ГОССТРОЙ СССР
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.П.ХОМЕНКО

КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ПРОГНОЗ

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук
Р.С. ЗИАНГИРОВ

МОСКВА
"НАУКА"
1986

УДК 551.448

Х о м е н к о В.П. **Карстово-суффозионные процессы и их прогноз.** М.: Наука, 1986.

В монографии рассматриваются основные закономерности и условия развития карстово-суффозионных процессов, механизм их образования. Предлагаемая методика моделирования суффозионных процессов на закарстованных территориях, принципы их прогнозирования имеют значение для организации борьбы с активизацией суффозии на освоенных территориях и правильного выбора мест для нового строительства.

Табл. 7. Ил. 35. Библиогр.: 116 назв.

Рецензенты:

В.М. Кутепов, В.В. Толмачев

Виктор Петрович Х о м е н к о

КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ПРОГНОЗ

Утверждено к печати Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве Госстроя СССР

Редактор *Б.С. Шохет.* Художник *Е.Н. Волков*
Художественный редактор *Л.В. Кабатова.* Технический редактор *Н.М. Бурова*
Корректор *О.А. Пахомова*

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 31649

Подписано к печати 24.02.86. Т – 03532. Формат 60 X 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0. Усл. кр.-отт. 6,3
Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 750 экз. Тип. зак. 86. Цена 1 р. 10 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

X $\frac{3202000000\text{-}154}{042\,(02)\,\text{-}86}$ 301–86–I

© Издательство "Наука", 1986 г.

ВВЕДЕНИЕ

Карстово-суффозионные процессы широко распространены на территории СССР и особенно в ее Европейской части. Классическими районами их развития являются Советская Прибалтика, центральные районы, Поволжье, Предуралье и Предкарпатье. Отмечаются они и за рубежами нашей страны, практически на всех континентах земного шара. Интерес к изучению карстово-суффозионных процессов во всем мире неуклонно растет, чему в немалой степени способствует их усилившаяся за последние десятилетия техногенная активизация на территориях крупных городов, промышленных и горнодобывающих центров, а также в прибрежных зонах водохранилищ.

В наши дни перед советской наукой поставлена важная общегосударственная задача – предвидение возможных отрицательных последствий интенсивного воздействия человека на окружающую (в том числе и на геологическую) среду. Ярким примером таких последствий является карстово-суффозионное провалообразование, вызванное техногенными изменениями гидрогеологической обстановки и способное в особо неблагоприятных условиях привести к разрушению объектов промышленного, гражданского и других видов строительства. При этом хорошо известно, что рациональный выбор инженерных мероприятий, направленных на защиту территорий и отдельных сооружений от опасных геологических процессов, должен базироваться на количественном прогнозе этих процессов.

В настоящее время методика количественного прогнозирования развития карстово-суффозионных процессов разработана слабо. По мнению автора книги, такое положение связано с недостаточным пониманием их механизма, дополнительно усугубляемым терминологической неупорядоченностью. Главная цель настоящей работы заключается в устранении этого пробела. Для удобства изложения материала и конкретизации объекта исследований карстово-суффозионные процессы рассматриваются в ней как вполне самостоятельный комплекс процессов и явлений, несмотря на то что они несомненно являются частью карста и разновидностью суффозии.

В основе концептуальных представлений и прогнозных решений, изложенных в предлагаемой монографии, лежит обобщение отечественного и зарубежного опыта изучения карстово-суффозионных процессов, анализ результатов специальных экспериментов, проведенных автором на лабораторных установках собственной конструкции, а также полевые материалы, собранные им на территориях Московской и Горьковской областей. Пользуясь случаем, автор выражает глубокую признательность коллективу Дзержинской карстовой лаборатории ПНИИИСа Госстроя СССР за оказанную ему всестороннюю помощь в постановке и осуществлении экспериментальных работ.

КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Карстово-суффозионные процессы. Термин "карстово-суффозионные процессы" впервые появился более сорока лет назад в работах М.С. Кавеева и Г.В. Короткевича. Этот термин быстро вошел в обиход и в наши дни широко используется в инженерном карстоведении, однако до сих пор не имеет четкого определения. Согласно их собственным описаниям, авторы термина понимали под карстово-суффозионными процессами суффозионное разрушение нисходящим подземным потоком дисперсных покрывающих водонасыщенных (Кавеев, 1956) или неводонасыщенных (Короткевич, 1964) пород и их вынос в незакольматированные трещины или полости в карстующихся породах. Подобного рода процессы имеют место только в условиях покрытого карста и способны привести к образованию подземных полостей в покрывающих породах и провалов на поверхности земли. В последние годы понятие "карстово-суффозионные процессы" было расширено И.А. Печеркиным и исследователями его школы (Печеркин, Закоптелов, 1982) за счет включения в него суффозионного выноса заполнителя трещин и полостей в карстующихся породах и, таким образом, было распространено на районы открытого карста.

Вскоре после своего появления новый термин был переосмыслен Н.А. Гвоздецким (1972), который считал, что карстово-суффозионными процессами следует называть растворение солевых включений в дисперсных породах или известковистого и гипсового цемента песчаников и конгломератов в сочетании с механическим выносом нерастворимых частиц подземными водами. Такое понимание термина "карстово-суффозионные процессы" довольно прочно вошло в физическую географию (Четырехъязычный энциклопедический словарь..., 1979), но не было принято инженерной геологией.

В свою очередь, некоторые геологи иногда именуют карстово-суффозионными чисто суффозионные процессы, приводящие к формированию явлений, морфологически сходных с карстом (псевдокарст) в районах полного отсутствия карстующихся пород. Это связано с существованием понятия "суффозионный карст", введенного А.В. Ступишиным (1972). Хотя автор этого термина не называет суффозионные полости и провалы суффозионно-карстовыми или карстово-суффозионными, такое желание постоянно возникает в полном соответствии с законами русской лингвистики.

Попытки вложить в понятие "карстово-суффозионные процессы" иной смысл, чем тот, который в него вкладывали сами авторы, следует признать неудачными, поскольку в обоих случаях речь идет о процессах и явлениях, не относящихся к карсту. Расширение же этого понятия за счет дополнительного включения в него процессов, одновременно имеющих отношение и к карсту и к суффозии, вполне оправданно и даже целесообразно. Оно позволяет исследователю при идентификации подобных явлений выходить за рамки специфических природных условий, изученных М.С. Кавеевым и Г.В. Короткевичем.

Исходя из изложенного, а также в результате критического анализа отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам изучения

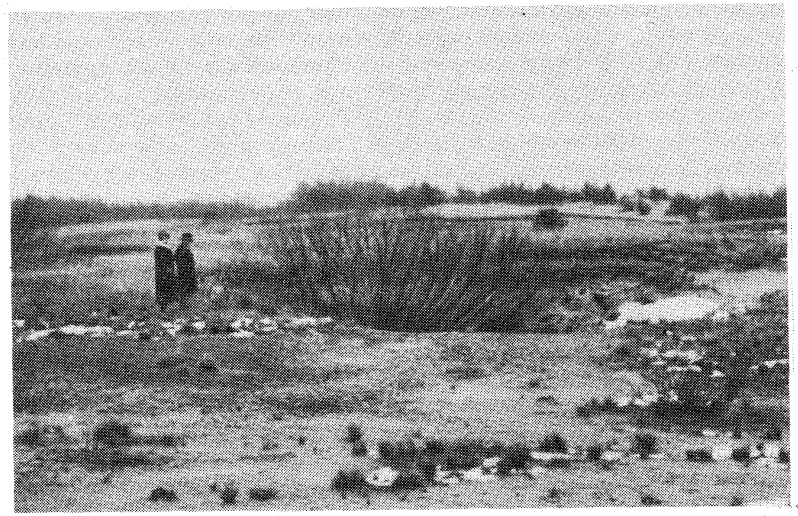


Рис. 1. Одна из многочисленных провальных карстово-суффозионных воронок, сформировавшихся в районе действия мощного подземного водозабора. Фото автора

рассматриваемых в данной работе процессов и явлений, автор считает, что под карстово-суффозионными процессами следует понимать *разрушение дисперсных нерастворимых пород и их перемещение в карстовые трещины и полости или внутри них, вызванные действием гидродинамических и гравитационных сил.* Развитие карстово-суффозионных процессов приводит к изменению водопроницаемости закарстованных пород, к формированию специфического заполнителя карстовых полостей и трещин, вызывает образование в дисперсных покрывающих породах полостей, зон перемещения и разуплотнения, а на поверхности земли – воронок (рис. 1) и оседаний.

Термин "карстово-суффозионные процессы" в предлагаемом понимании имеет синонимы (Васильев, 1953): просасывание (при отсутствии постоянных водоносных горизонтов в покрывающих породах), просачивание, вмывание и вымывание (при их наличии). По-видимому, следует согласиться с Д.С. Соколовым (1962), выступавшим против этих терминов, поскольку они не указывают на связь с карстом.

В иностранных публикациях иногда можно встретить термин "коррозионно-суффозионные процессы" (Liszkowski, 1967), но, как правило, за рубежом не существует специальной терминологии, соответствующей этому понятию. Вместе с тем процессы и явления, подпадающие под предложенное определение, хорошо известны во всем мире, и в частности, фигурируют в отчете Комиссии по инженерным изысканиям Международной ассоциации по инженерной геологии (Report..., 1981), где они включены в группу опасных природных и техногенных факторов (natural and man-made hazards), приводящих к образованию провалов и оседаний.

Из определения карстово-суффозионных процессов и даже из самого

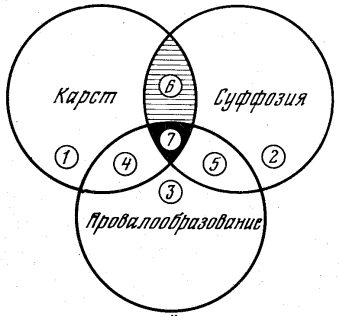


Рис. 2. Логическая схема взаимоотношений между понятиями "карст","суффозия" и "провалообразование"

1 – растворение карстующихся пород и карстово-обвальные процессы, не сопровождающиеся провалообразованием; *2* – разрушение дисперсных пород подземными водами и их вынос на земную поверхность или в подземные полости некарстового происхождения, не сопровождающиеся провалообразованием; *3* – образование провалов в результате обрушения горных пород над подземными полостями некарстового и несуффозионного происхождения; *4* – карстово-обвальные процессы, сопровождающиеся провалообразованием; *5* – суффозионно-обвальные процессы, сопровождающиеся провалообразованием; *6* – карстово-суффозионные процессы, не сопровождающиеся провалообразованием; *7* – карстово-суффозионно-обвальные процессы, сопровождающиеся провалообразованием

их названия следует, что они представляют собой сложный комплекс нескольких процессов-компонентов, каждый из которых, в свою очередь, является частью более широкого понятия (рис. 2). Терминам, обозначающим эти понятия (карст, суффозия, провалообразование), так же как и термину "карстово-суффозионные процессы", свойственна неопределенность, выражающаяся в полисемии (многозначности) и синонимии (Даниленко, 1977), поэтому имеет смысл остановиться на каждом из них в отдельности и определить отношение к ним автора данной работы.

Карст. В настоящее время существует много определений понятия "карст". В отечественной инженерной геологии под карстом чаще всего понимают совокупность геологических процессов и явлений, связанных с растворением так называемых карстующихся пород: известняков, доломитов, мелов, гипсов, ангидритов и каменных солей. Из контекста многочисленных зарубежных публикаций, посвященных вопросам изучения карста для целей строительства, следует, что подавляющее большинство их авторов вкладывает в это понятие приблизительно тот же смысл (Терминологический словарь..., 1973). Необходимо, однако, отметить, что в англоязычных (особенно американских) работах термин "карст" и производные от него термины встречаются довольно редко и в основном используются в публикациях, не носящих инженерно-карстоведческого характера, что связано с характерной для английского языка сильной географической окрашенностью этого понятия (Толковый словарь..., 1978).

В зависимости от химического состава карстующихся пород и их способности к растворению карст подразделяется на карбонатный, сульфатный и соляной. Иногда в качестве самостоятельной разновидности выделяется меловой карст. Карст может быть открытым, когда карстующиеся породы выходят на земную поверхность или задернованы, и покрытым, когда над ними залегают некарстующиеся (как правило, дисперсные) водонасыщенные или неводонасыщенные породы, обычно именуемые покрывающими.

Проявления карста весьма разнообразны (Liszkowski, 1967) и обусловлены действием растворения, а также гравитационных и гидродинамических сил. На поверхности карст проявляется в виде различных форм поверхностного растворения карстующихся пород (для условий открытого карста), воронок и оседаний локального или обширного характера (мульд). К подземным карстопроявлениям относятся полости, зоны дезынтеграции карстующихся пород, разуплотнения и перемещения покрывающих пород, неровности в кровле карстующихся пород (для условий покрытого карста), заполнитель карстовых полостей.

В термин "карстово-суффозионные процессы" "карст" входит по двум причинам. Во-первых, полости, трещиноватые и брекчированные зоны в карстующихся породах могут служить областью суффозионного выноса (кольматации) и транзита некарстующихся дисперсных пород, а их заполнитель сам способен подвергаться суффозионному разрушению. В принципе в такой же роли могут выступать и карстовые полости в покрывающих породах. Исследование карстовых полостей и трещин как потенциального приемника разрушенных вышележащих пород является составной частью их более широкого инженерно-геологического изучения, необходимость которого постоянно подчеркивается В.Н. Дублянским (1980) и другими исследователями.

Во-вторых, в условиях сульфатного и соляного карста в карстово-суффозионные процессы может входить и растворение карстующихся пород. Более того, некоторые специалисты (Парфенов, 1981) считают, что это относится и к карбонатным породам. Вместе с тем результаты лабораторного физического моделирования карстово-суффозионных процессов свидетельствуют о том, что растворение может не принимать в них никакого участия.

Суффозия. В конце прошлого века А.П. Павловым была выделена особая совокупность геологических процессов и явлений, связанных с растворением и механическим разрушением дисперсных водопроницаемых пород подземными водами, следствием чего является вынос минерального вещества этих пород. Он назвал этот процесс подкапыванием или суффозией (Павлов, 1898), причем латинизированная форма термина оказалась весьма удачной. Предпринятые впоследствии попытки замены термина "суффозия" термином "кластокарст" (Максимович, 1963) не увенчались успехом.

Согласно А.П. Павлову, суффозия связана с выходом подземного потока на дневную поверхность и выражается в виде оседаний. Вскоре, однако, стало ясно, что этим круг суффозионных явлений не ограничивается, что частицы пород могут выноситься также в поровое пространство, трещины и подземные полости различного (в том числе и искусственного) происхождения, на поверхности земли кроме оседаний могут формироваться суффозионные воронки, оползни и овраги, а под землей – суффозионные полости.

Термин "суффозия" широко вошел во все европейские языки, за исклю-

чением английского, где его частичным эквивалентом является слово "piping" (Толковый словарь..., 1978). Во французском языке помимо термина "suffosion" гораздо чаще можно встретить его синоним – "renard" (Словарь технических терминов..., 1958).

В настоящее время имеется несколько классификаций суффозии, разработанных в разные годы разными авторами (Бочков, 1936; Печеркин, Закоптелов, 1982; Славянов, 1979). Несмотря на отдельные расхождения, в целом все они отражают тот факт, что суффозионное разрушение дисперсных пород подземными водами может осуществляться путем растворения карбонатных, сульфатных или хлоридных включений, а также вследствие гидродинамического воздействия на нерастворимые компоненты. В свою очередь, гидродинамическое разрушение дисперсных пород может протекать либо в виде размыва, в случае свободного течения сосредоточенного подземного потока, либо – различных фильтрационных деформаций несвязных водопроницаемых пород. Именно такое разнообразие суффозионных разрушений вызвало появление разных толкований термина "суффозия".

Под этим словом в наши дни понимают: 1) совокупность растворения, размыва и фильтрационного разрушения дисперсных пород (Печеркин, Закоптелов, 1982), т.е. практически то же, что понимал сам автор термина; 2) растворение солей и механическое вымывание подземными водами мелких частиц дисперсных пород (Геологический словарь, 1978); 3) растворение солевых включений и фильтрационное разрушение несвязных пород (Славянов, 1979); 4) гидродинамическое разрушение дисперсных пород подземными водами (Золотарев, 1983); 5) свободный фильтрационный вынос мелких частиц сквозь поры скелета несвязных пород (Рейтер, Кленгель, Пашек, 1983). Однако такая многозначность относится к термину "суффозия", когда он рассматривается изолированно, а применительно к понятию "карстово-суффозионные процессы" суффозией почти единодушно именуют сочетание фильтрационных и эрозионных разрушений дисперсных пород подземными водами. Такого же понимания термина "суффозия" придерживается и автор настоящей работы, допуская при этом участие процессов растворения в ранних фазах суффозионного разрушения.

Для того чтобы отделить суффозионное растворение от суффозионного размыва, многие разделяют суффозию на химическую и механическую. Поскольку первый тип суффозии в чистом виде не принимает участия в составе карстово-суффозионных процессов, он в данной работе подробно не рассматривается. Кроме того, следует отметить, что некоторые исследователи не без серьезных оснований отрицают сам термин "химическая суффозия" (Лютадзе, 1977).

Что же касается механической суффозии, то именно здесь существует большая терминологическая путаница. Дело в том, что термин "суффозия", возникший в геодинамике, вскоре был заимствован гидротехникой, которая в своей повседневной практике сталкивается с весьма определенным типом неблагоприятных геологических процессов – техногенной механической суффозией, зачастую протекающей в искусственных породах. В результате некоторые специалисты в области инженерной геодинамики, как уже было показано, считают фильтрационные разрушения несвязных

пород частью единого суффозионного процесса, а гидротехники рассматривают механическую суффозию как разновидность фильтрационных разрушений. Это, в частности, нашло отражение в существующих классификациях фильтрационных разрушений (Истомина, 1957; Лыкошин, 1976; Мироненко, Шестаков, 1974; Ziems, 1967).

Входящие в состав суффозии процессы размывания дисперсных пород подземными водами некоторые специалисты суффозией не считают и называют подземной или внутренней эрозией. Эти термины широко распространены, но в них очень часто вкладывается разный смысл. Многие, вслед за К. Терцаги и Р. Пеком (1958), понимают под подземной эрозией полное фильтрационное разрушение структуры несвязных пород, начинающееся на выходе потока и регрессивно распространяющееся в глубь массива. Наиболее последовательно это выражено в работе Ю. Цимса (Ziems, 1967), где подземная эрозия представлена в виде внешней, внутренней, щелевой (Fugenerosion) и контактной. Внутренняя эрозия, по Ю. Цимсу, соответствует подземной эрозии, по К. Терцаги и Р. Пеку, а внешняя – донной эрозии по А.Г. Лыкошину (1976). В большинстве же отечественных работ под подземной эрозией понимается либо размыв свободным потоком подземных вод заполнителя карстовых полостей и трещин (Лыкошин, 1976), т.е. внешняя эрозия, по Ю. Цимсу, протекающая под землей, либо размыв в местах неплотных стыков грунта с подземными сооружениями (щелевая эрозия Ю. Цимса) или в каких-либо других каналах фильтрации типа трещин, корневых ходов и т.п. (Котлов, 1978).

Суффозия по-разному протекает в несвязных (Хоменко, 1982) и связных (Истомина, Буренкова, Мишурова, 1975) дисперсных породах. Некоторые исследователи склонны выделять в особую разновидность суффозию в лёссовых породах, именуя ее лёссовым псевдокарстом (Кригер, 1973). Доминирующую роль в суффозионном разрушении несвязных пород играют фильтрационные деформации, а связных – размыв. Именно поэтому необходимым условием развития суффозии в слабопроницаемых связных породах, не содержащих легкорастворимые компоненты, является наличие в них каналов сосредоточенной фильтрации естественного или искусственного происхождения (трещин, корневых ходов, контактных зон, скважин и т.п.).

В связных породах, имеющих солевые включения, развитию гидродинамических суффозионных разрушений могут предшествовать процессы растворения (Панюков, 1978). В определенных условиях это может вызвать формирование каналов сосредоточенной фильтрации. Внутри подобного или ранее существовавшего канала вода в процессе течения разрушает его стенки путем отрыва отдельных мелких частиц и агрегатов с постепенным переходом к размыву (Sherard et al., 1976). Суффозионное разрушение заполнителя полостей и трещин, представленного слабопроницаемыми связными породами, может осуществляться также и за счет гидростатического "выдавливания" в результате нарастания давления воды (Молоков, 1969). При этом образуются каналы сосредоточенной фильтрации на стыках со стенками трещин и полостей или в виде разрывных нарушений сплошности несвязных пород, после чего начинается размывание этих каналов.

Для несвязных пород характерна следующая картина развития суффо-

зионных разрушений: с постепенным увеличением фильтрационного градиента вначале происходит свободное перемещение мелких частиц в поровом пространстве, а затем наступает полное разрушение структуры породы, которое Н.М. Бочков (1936) называет суффозией массы, а В.С. Истомина (1957) – выпором. Однако первый процесс может протекать только в так называемых суффозионных породах и его развитие полностью исключается, если мелких частиц слишком мало или они не имеют возможности свободно перемещаться в порах (Кондратьев, 1958). Если в несвязных породах имеются каналы сосредоточенной фильтрации, в них развивается размывание. Если же таких каналов нет, они могут возникнуть в "суффозионных" разновидностях несвязных пород в результате свободного выноса мелких частиц сквозь поры (Ziems, 1967). В условиях восходящей фильтрации в несвязных породах протекает так называемая суффозия воздымания (piping by heave), которая либо локализуется в виде сосредоточенных размывов (Kälin, 1977), либо принимает форму "взрыва" большой массы породы, именуемого гидравлическим разрушением (Ziems, 1967) или фильтрационным выпором (Терцаги, Пек, 1958).

Полное фильтрационное разрушение песчаных пород в восходящем потоке внешне протекает точно так же, как процесс их разжижения, несмотря на то что развитие этих двух процессов вызывается разными причинами. Именно это обстоятельство позволяет некоторым специалистам (Мироненко, Шестаков, 1974) относить, с известными оговорками, разжижение песков к фильтрационным деформациям.

Русский термин "разжижение" является прямым переводом английского слова "liquefaction", означающего переход какой-либо субстанции в жидкое состояние (Definition of terms..., 1978). В инженерной геологии, строительном и горном деле этот термин применяется только к дисперсным породам (Толковый словарь..., 1978, т. 2), главным образом к песчаным (Сергеев, Голодковская, Зиангиров и др., 1983), но иногда и к глинистым.

Применительно к пескам в отечественной литературе встречается два понимания термина "разжижение". Первое, более узкое, характерное также и для англоязычных работ (Толковый словарь..., 1978, т. 2), связано с представлением о том, что разжижение водонасыщенных песков возникает только в результате разрушения их структуры под действием механических сил, приводящего к увеличению порового давления, и обязательно завершается уменьшением пористости (Иванов, 1962). Развитие этого процесса обусловлено возникновением в водонасыщенных песках временного восходящего фильтрационного потока, вот почему разжижение имеет внешнее сходство с фильтрационным выпором.

Авторы, придерживающиеся второго, более широкого понимания термина "разжижение", склонны рассматривать его в качестве синонима традиционного русского термина "плывунность" (Гольдштейн, 1953; Справочник..., 1981; Флорин, 1961). В настоящее время общепринятым является представление о существовании двух видов плывунности: истинной и ложной (Ломтадзе, 1977; Справочник..., 1981), хотя иногда в справочной литературе при определении термина "плывун" делается явный акцент на "истинную" разновидность (Геологический словарь..., 1978; Муравски, 1980; Терминологический словарь..., 1973). В соответствии с этими представлениями В.А. Флорин (1961) разделил разжижение водонасыщенных

песков на тиксотропное (истинный плывун) и механическое (псевдо плывун). Для тиксотропного разжижения определяющим фактором в его развитии служит вещественный состав породы, и в частности, его биологическая компонента. Механическое разжижение в отличие от тиксотропного обусловлено механическими воздействиями, а состав и свойства песков играют подчиненную роль.

Согласно схеме В.А. Флорина, механическое разжижение песков в зависимости от причины, его вызывающей, распадается на три типа: фильтрационное, статическое и динамическое. В первом случае процесс является результатом действия гидродинамических сил, во втором – сдвига одних частей песка относительно других, в третьем – динамических и ударных воздействий. Условия всех трех типов механического разжижения определяются специфическим набором факторов для каждого из них. Тиксотропное разжижение может быть вызвано динамическими или фильтрационными воздействиями значительно меньшей интенсивности по сравнению с необходимой для разжижения соответствующих типов (Ломтадзе, 1977). М.Н. Гольдштейн (1953) объединяет статическое и динамическое разжижение термином "внезапное разжижение", и именно под внезапным разжижением он понимает те процессы, которые сторонники первого понимания термина "разжижение" считают собственно разжижением водонасыщенных песков.

Учитывая изложенные представления о процессе разжижения песков можно прийти к выводу, что первое понимание этого термина более предпочтительно, так как оно позволяет избежать нежелательной синонимии. Даже при таком, явно более строгом, понимании термину "разжижение" свойственна некоторая расплывчатость, особенно в той части, которая касается разрушения структуры песка под воздействием гидродинамических сил, поскольку крайне трудно провести четкие границы между отдельным гидродинамическим импульсом, длительной серией импульсов и постоянным фильтрационным потоком (Иванов, 1962).

В настоящее время представление о том, что разжижение водонасыщенных песков может выступать в роли одного из компонентов карстово-суффозионных процессов, прочно вошло в сознание многих специалистов (Саваренский, 1965; Парфенов, 1981). Именно поэтому, а также по причине схожести общей картины протекания процессов разжижения и фильтрационного выпора песков, нецелесообразно отделять разжижение от комплекса процессов и явлений, именуемого суффозией, по крайней мере применительно к понятию "карстово-суффозионные процессы".

Провалообразование. В отечественной специальной литературе слово "провал" понимается разными авторами двояко: и как процесс (Лукин 1964), и как явление (Копосов, Тычина, 1983), а иногда как и то и другое одновременно. Исследователи, считающие провал процессом, называют свежее проявление этого процесса на земной поверхности провальной впадиной или провальным углублением. Те же, кто понимает провал как явление (в том числе и автор данной работы), обычно именуют формирующий его процесс подземным обрушением или провалообразованием. Сторонники обоих точек зрения единодушно применяют для обозначения старого поверхностного проявления этого процесса термин "провальная воронка".

Провал как геологическое явление представляет собой резко ограниченное уступом замкнутое, округлое в плане понижение на поверхности земли, образовавшееся в результате обрушения горных пород над ослабленным пространством, не способным служить им опорой. Именно такому определению соответствуют часто встречающиеся в литературе иностранные термины "sinkhole" (англ.), "effondrement" (фр.), "Erdfall" (нем.), которые обычно переводятся на русский язык словом "провал".

Поскольку существование подземной полости или ослабленного пространства, над которым происходит обрушение пород, может быть вызвано разными причинами, провалообразование имеет различную генетическую основу. Провалы, в частности, формируются в результате растворения карстующихся пород и суффозии, а также при обрушении кровли подземных горных выработок. В СССР провалообразование первых двух типов является объектом изучения инженерной геологии, а провалы третьего типа изучаются горной наукой. В практике отечественного промышленного и гражданского строительства (Рекомендации..., 1967) карстовые провалы принято разделять по их генезису на карстово-обвальные (связанные с обрушением кровли карстовых полостей), карстово-суффозионные и карстово-суффозионно-обвальные (смешанные).

За рубежом, особенно в англоязычных странах, провалы рассматриваются как разновидность понижений земной поверхности (subsidences), образующихся в результате опускания ее отдельных участков. Все процессы, приводящие к формированию подобных явлений, искусственно группируются в единую, весьма разнородную совокупность (Report..., 1981). Подобный подход непривычен для советских исследователей, но не лишен здравого смысла. Собственно говоря, именно это обстоятельство позволяет использовать при оценке карстовой и суффозионной опасности некоторые расчетные решения, применяемые в горном деле.

Из всех процессов, входящих в состав карстово-суффозионных, провалообразование представляет наибольшую угрозу для зданий и сооружений. Именно поэтому количественная оценка провальной опасности — первоочередная задача прогнозирования развития карстово-суффозионных процессов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И УСЛОВИЙ ИХ ПРОТЕКАНИЯ

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

В настоящее время природа карстово-суффозионных процессов изучена явно недостаточно, что объективно связано с невозможностью наблюдения за их развитием внутри массива, где они в основном и протекают. Не последнюю роль в сложившемся положении играют разрозненность и фрагментарность исследований, посвященных данному вопросу, а также отсутствие терминологической упорядоченности и строгих определений отдельных понятий.

Изучение карстово-суффозионных процессов осуществлялось и ос
ществляется в основном двумя путями: с помощью полевых натурн
наблюдений и на основе лабораторного эксперимента. Результаты эт
исследований в большинстве случаев излагаются в виде пространных сл
весных описаний и очень редко содержат рисунки и графические схемы. Л
бораторное физическое моделирование карстово-суффозионных процесс
до сих пор продолжает носить в основном качественный характер и, к
правило, не влечет за собой теоретических обобщений. Математическ
моделирование при изучении карстово-суффозионных процессов практ
чески не применяется.

Несмотря на это, можно сделать вывод, что карстово-суффозионны
разрушения дисперсных покрывающих пород развиваются в услови
трех типов (рис. 3): *а* – при отсутствии в них постоянных водоносны
горизонтов; *б* – при наличии единого водоносного горизонта в карсту
щихся и покрывающих породах; *в* – в условиях, когда водоносный г
ризонт в карстующихся породах отделен от водоносного горизонта
покрывающих породах водоупорным слоем. Суффозионное разрушен
заполнителя карстовых полостей и трещин может происходить и при о
сутствии покрывающих пород.

Представления отдельных исследователей о механизме карстово-суфф
зионных процессов тесно связаны с особенностями природной обстановк
в которой эти процессы наблюдались в натуре или воспроизводились на ф
зических моделях.

Если покрывающие отложения водопроницаемы или содержат верт
кальные фильтрационные каналы и целиком находятся в зоне аэраци
то при поступлении в них поверхностных вод, вызванном естественны
или искусственными причинами, происходит суффозионный вынос порс
в карстовые трещины и полости (Васильев, 1953; Короткевич, 1964
Dearman et al., 1982). При этом на контакте покрывающих пород с по
земной карстовой формой начинает развиваться суффозионная полост
растущая вверх в результате последовательного формирования сводо
обрушения, вплоть до выхода на поверхность в виде провала. Такая схем
наиболее последовательно была изложена в работе Г.В. Короткевича (1964
и нашла экспериментальное подтверждение в опытах, поставленных А.С. Де
дариани (1960) и В.С. Лукиным (1964), причем эксперименты показал
также возможность роста суффозионной полости и вследствие постепе
ного расширения первоначального канала сосредоточенной фильтраци
На месте выхода такого канала на земную поверхность или на участк
скопления поверхностных вод может сформироваться так называема
воронка просасывания, образующаяся за счет размыва дисперсных поро
нисходящим водным потоком (Васильев, 1953).

В случае, когда закарстованные породы перекрыты водопроницаемым
песчаными отложениями, может происходить как бы обратный процесс
вызванный подъемом уровня трещинно-карстовых вод выше отметк
кровли карстующихся пород. Он выражается в разрушении покрываю
щих пород подземными водами, поступающими снизу из карстовых тре
шин и поноров, причем такое поступление воды также может быть вызван
как естественными, так и искусственными причинами. Лабораторное мо

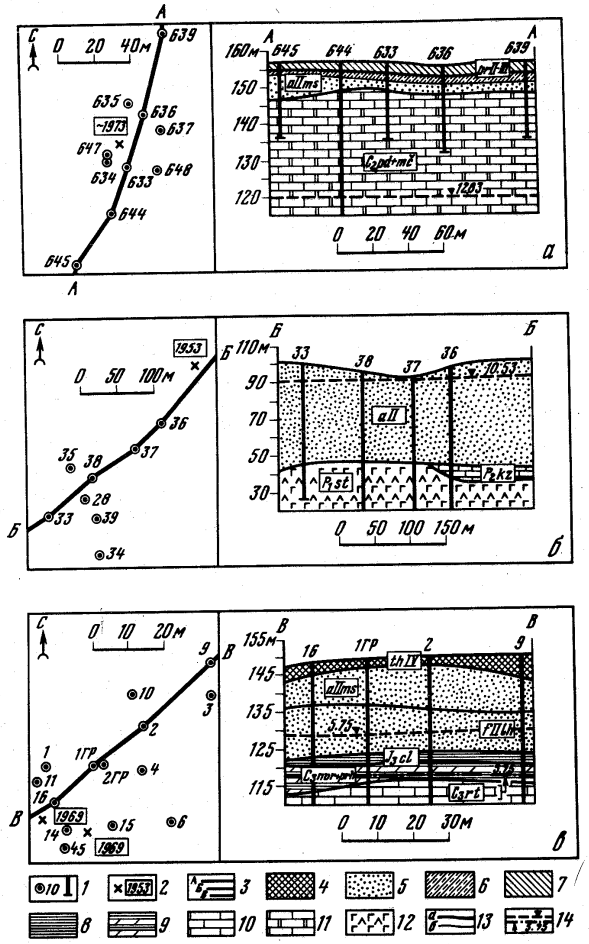


Рис. 3. Основные типы геологического строения территорий с интенсивным развитием карстово-суффозионных процессов в условиях покрытого карста

а – отсутствие постоянных водоносных горизонтов в покрывающих породах; *б* – наличие единого водоносного горизонта в покрывающих и карстующихся породах; *в* – наличие самостоятельных водоносных горизонтов в покрывающих и карстующихся породах; *1* – скважина и ее номер; *2* – местоположение центра карстово-суффозионного провала и год его образования; *3* – линии геологических разрезов; *4* – техногенные породы; *5* – пески; *6* – супеси и суглинки; *7* – суглинки; *8* – глины; *9* – глины и мергели; *10* – известняки; *11* – известняки и доломиты; *12* – гипсы и ангидриты; *13* – стратиграфические (*а*) и литологические (*б*) границы; *14* – уровни и напоры подземных вод, месяц и год их замера

делирование этого процесса, выполненное группой японских исследователей (Nogushi, Takahashi, Tokumitsu, 1970), показало, что и в этом случае наблюдается формирование растущих полостей, которое может привести к возникновению провалов на поверхности земли.

При наличии в дисперсных породах покрывающей толщи безнапорного водоносного горизонта разрушение водонасыщенных пород под воздействием нисходящего фильтрационного потока и их перемещение в карстовые трещины и полости приводит к образованию и последовательному росту промежуточных полостей на границе зон аэрации и насыщения, способных достигать земной поверхности (Кавеев, 1956). Если при этом в покрывающих и карстующихся породах присутствует единый водоносный горизонт, карстово-суффозионные процессы могут быть вызваны перепадами напоров в результате естественного или искусственного изменения уровенного режима, например при дренировании трещинно-карстовых вод (Газизов, 1968; Foose, 1953).

Когда в процессе растворения и обрушения карстующихся пород верхняя часть растущей карстовой полости достигает контакта с обводненными песками, в них начинают развиваться гравитационно-гидродинамические разрушения (Газизов, 1968; Berger, 1968). Исследования, проведенные на объемных (Архидьяконских, 1971) и "плоских" (Толмачев, Карпов, Хоменко и др., 1982) фильтрационных моделях, показали, что развитие таких разрушений приводит к формированию полостей в водонасыщенных песках и в конечном счете к провалообразованию. При этом предполагается, что трещинно-карстовые воды лишены напора, а в карстовой полости хотя бы частично отсутствует вода.

Согласно А.П. Саваренскому (1965), динамические и ударные воздействия на водонасыщенные пески, связанные с резкими деформациями кровли карстовой полости, например в результате ее обрушения, приводят к развитию процессов разжижения и просасывания плывуна в незаколь-матированные подземные карстовые формы. В зонах насыщения и аэрации при этом образуются обвальные полости, способные при определенных условиях выйти на поверхность. С.И. Парфенов (1981) считает, что разжижение водонасыщенных песков покрывающей толщи может возникнуть в результате растворения стенок карстовой полости, служащих опорой скелетным частицам песка. При этом песок теряет устойчивость и процесс разжижения распространяется вверх.

Если между водонасыщенными покрывающими и карстующимися породами расположен водоупор, карстово-суффозионные процессы способны развиваться только при наличии в нем сквозных нарушений сплошности. Такие нарушения могут возникнуть в случае, когда водоупор является кровлей растущей карстовой полости (Толмачев, Карпов, Хоменко и др., 1982) или в результате изменения напряженного состояния покрывающих пород, вызванного техногенными воздействиями на подземную гидросферу (Кутепов, 1983). На механические разушения водоупора иногда накладываются процессы растворения солевых включений (Глуховский, 1978) или последствия гидродинамического воздействия нисходящего подземного потока (Wilk, Motyka, Niewdana, 1973). При этом нисходящая фильтрация, вызывающая суффозионное разрушение водонасыщенных

пород, расположенных над водоупором, и самого водоупора, возникает вследствие более низкого положения отметки пьезометрического напора трещинно-карстовых вод по отношению к отметке уровня или напора лежащего выше водоносного горизонта (Кожевникова, 1980). Такая гидрогеологическая ситуация может быть характерной для данной территории или создается искусственно, путем поступления воды в покрывающие породы или ее отбора из карстующихся пород (Котлов, 1978).

Гидродинамическое разрушение заполнителя полостей и трещин в карстующихся породах часто принимает разнообразные формы и сочетает в себе фильтрационное разрушение, оплывание в местах выхода на откосы, размыв и "выдавливание" слабопроницаемых "пробок" (Лыкошин, 1976; Молоков, 1969), Суффозионному размыву заполнителя способствует растворение стенок трещин и полостей (Печеркин, Закоптелов, 1982). В свою очередь, декольматация подземных карстовых форм создает необходимые условия для перемещения в них лежащих выше дисперсных покрывающих пород, подвергшихся суффозионному разрушению.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

Разрозненные представления разных авторов о природе карстово-суффозионных процессов и условиях их протекания в целом сливаются в единую и достаточно стройную картину. Нетрудно видеть, что карстово-суффозионные разрушения отличаются большим разнообразием и приводят к формированию не менее разнообразных подземных и поверхностных явлений.

Геологическую среду, в которой протекают карстово-суффозионные процессы, можно представить в виде сложной динамической системы, так, как это делают специалисты в области изучения оползней (Дискуссия. . . , 1976). При таком подходе под карстово-суффозионным проявлением (явлением) следует понимать определенное состояние данной системы (в статике), выражающееся в изменении ее структурных особенностей, существовавших до развития карстово-суффозионных процессов, под карстово-суффозионным разрушением (процессом) – количественное изменение или качественную смену карстово-суффозионных проявлений во времени (в динамике), а под механизмом карстово-суффозионных процессов (разрушений) – закономерную последовательность их развития в пространстве и во времени.

Анализ существующих представлений о механизме карстово-суффозионных процессов и результаты исследований, проделанных автором данной работы, позволили ему представить общую картину развития этих разрушений в виде двух взаимосвязанных классификаций (рис. 4 и 5). Показанные на рис. 4 элементарные процессы–компоненты единой совокупности, объединяемой понятием "карстово-суффозионные разрушения", не всегда встречаются в природных условиях в чистом виде и способны протекать совместно в различных комбинациях. Это в равной степени относится и к карстово-суффозионным проявлениям (рис. 5). Некоторые элементарные карстово-суффозионные разрушения имеют сложную

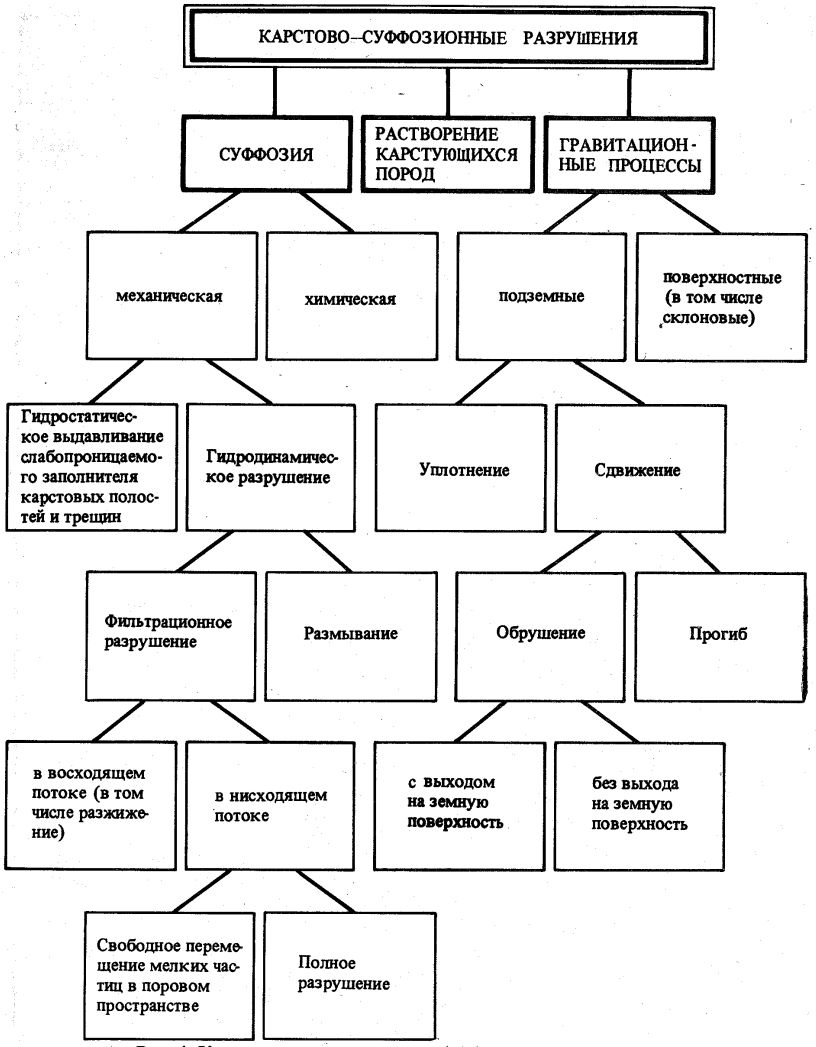


Рис. 4. Классификация карстово-суффозионных разрушений

природу и сами могут рассматриваться как комбинированные. В любом случае карстово-суффозионные разрушения должны восприниматься в тесном единстве с карстово-суффозионными проявлениями, поскольку первые фиксируются нами только посредством вторых, а вторые не возникают без первых.

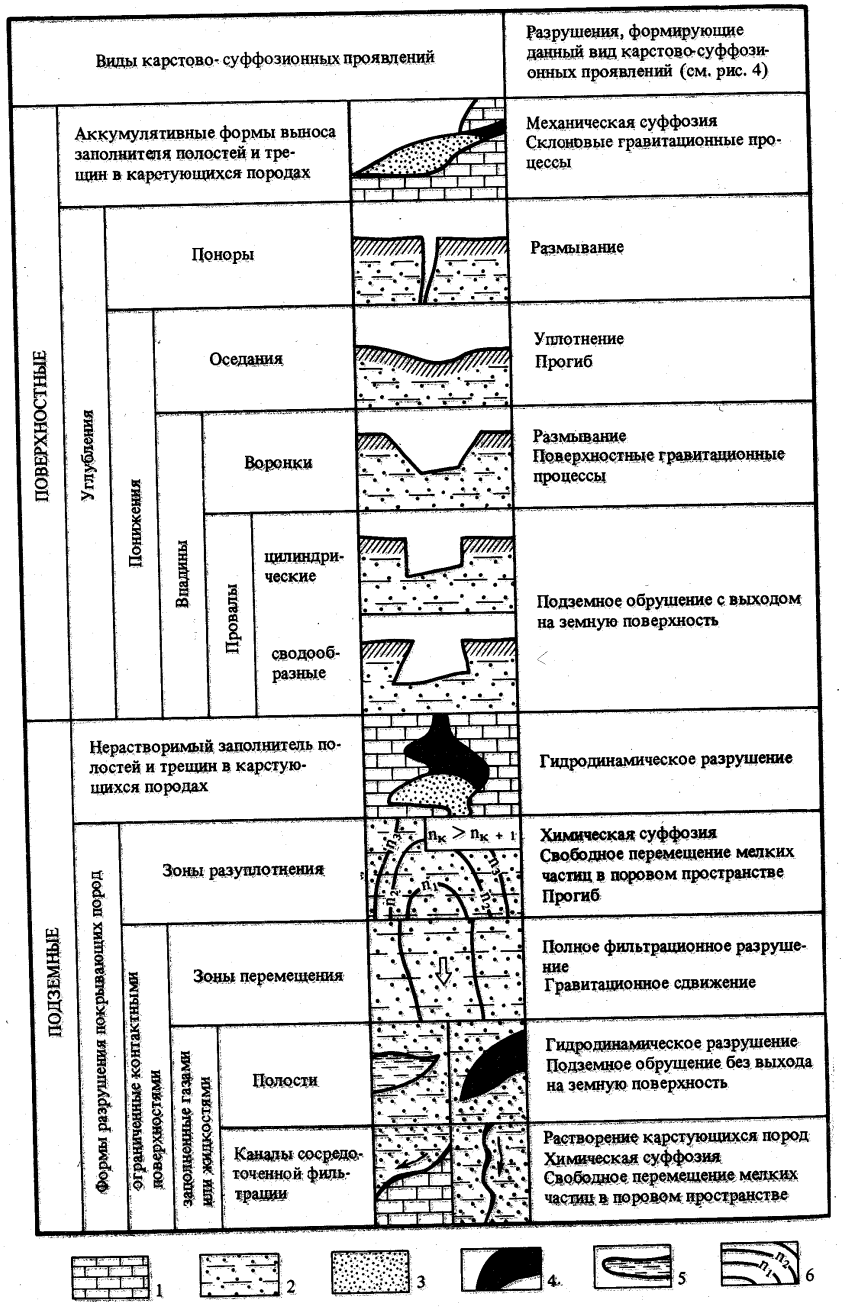


Рис. 5. Классификация карстово-суффозионных проявлений. Разработана при участии В.В. Толмачева

1 – карстующиеся породы; *2* – дисперсные покрывающие породы; *3* – заполнитель полостей и трещин в карстующихся породах; *4* – полости, не заполненные водой; *5* – полости, заполненные водой; *6* – изолинии пористости

На рис. 6 представлена перекрестная схема, иллюстрирующая многообразие типов геологической среды, в которой развиваются карстово-суффозионные разрушения. Поскольку характер протекания гидродинамических разрушений, представляющих собой главный компонент карстово-суффозионных процессов, определяется в первую очередь параметрами подземной гидросферы, типизация в значительной мере построена на гидрогеологической основе. Она базируется на представлениях, согласно которым подземные воды, присутствующие в виде постоянных водоносных горизонтов в массиве горных пород, затронутых карстово-суффозионными процессами, целесообразно разделять на трещинно-карстовые, циркулирующие в карстующихся породах, и надкарстовые, содержащиеся в покрывающей толще. Если в кровле карстующихся лежат несвязные водопроницаемые породы, трещинно-карстовые и надкарстовые воды могут сливаться в единый водоносный горизонт. В других случаях трещинно-карстовые и надкарстовые воды бывают отделены друг от друга так называемым подстилающим водоупором, а их уровни и напоры сочетаются в различных комбинациях. При наличии в покрывающей толще выдержанных слоев связных слабопроницаемых пород, которые обычно называют промежуточными водоупорами, надкарстовые воды, как правило, представлены несколькими водоносными горизонтами. Однако это обстоятельство не нашло отражения в предлагаемой типизации во избежание резкого усложнения ее структуры, ничего не меняющего по существу.

В схеме, представленной на рис. 6, только вертикальные границы являются "жесткими", так как они определяются литолого-геологическими характеристиками массива, практически не меняющимися в обозримые отрезки времени. Через горизонтальные же границы схемы, которые определяются только положением уровней и напоров подземных вод, возможны переходы, связанные с техногенными воздействиями на подземную гидросферу (утечками из подземных коммуникаций, инфильтрацией из искусственных водотоков и водоемов, сбросами бытовых и промышленных вод, искусственным подпором, откачками подземных вод и т.п.). Это обстоятельство нашло отражение в характеристике каждой из таксономических единиц типизации (табл. 1), где указана возможность мобильных переходов от одного типа природных условий к другому.

Элементарные карстово-суффозионные разрушения или их определенные комбинации способны возникать и развиваться только в определенных природных условиях. Каждое из элементарных карстово-суффозионных разрушений имеет присущие только ему необходимые условия своего развития, и отсутствие хотя бы одного из этих условий делает данный вид разрушений невозможным.

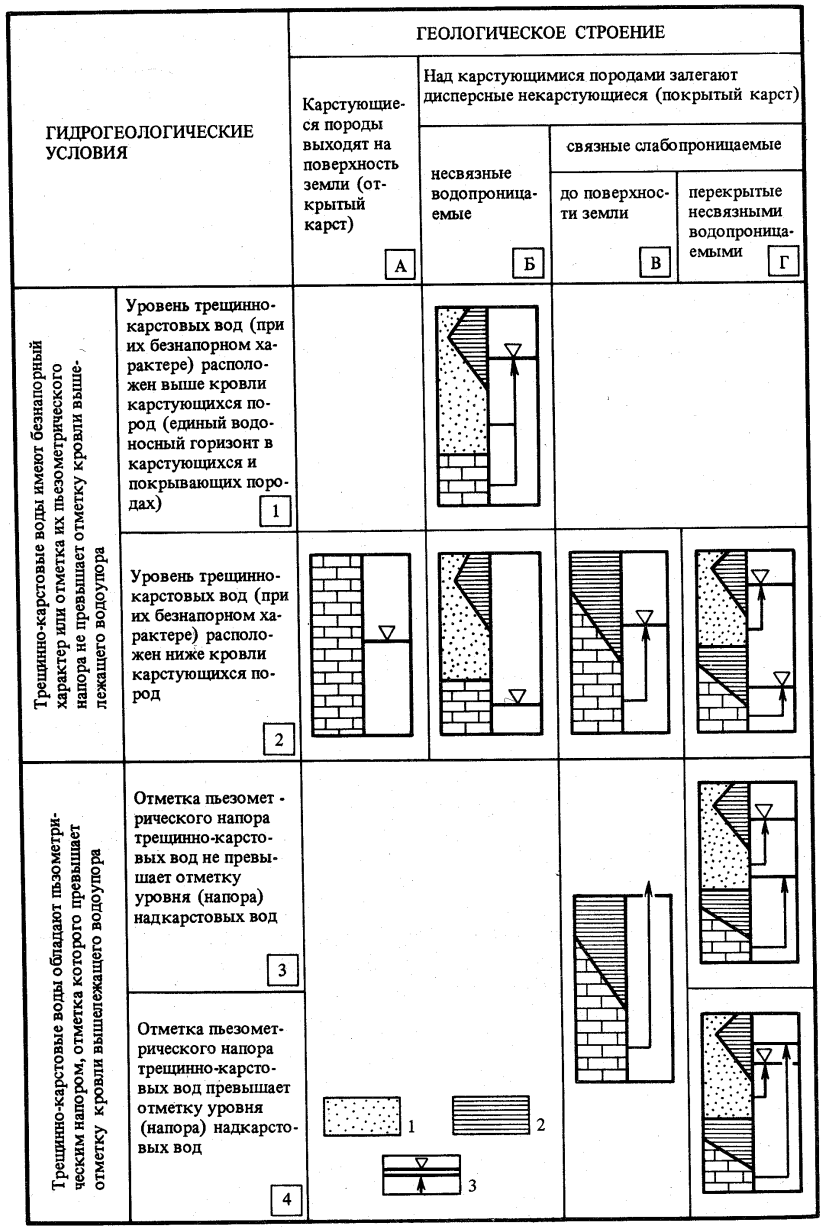


Рис. 6. Типизация природных условий развития карстово-суффозионных процессов

1 – несвязные водопроницаемые покрывающие породы; *2* – связные слабопроницаемые покрывающие породы; *3* – уровни и напоры подземных вод. Остальные обозначения см. рис. 5

Таблица 1. Характеристика типов природных условий с точки зрения возможности развития отдельных видов карстово-суффозионных разрушений

Тип природных условий (см. рис. 6)	Карстово-суффозионные разрушения, развитие которых в данных условиях полностью исключается (см. рис. 4)	Примечания
Б1	–	При переходе к условиям типа Б2 становится невозможным фильтрационное разрушение в восходящем потоке
А2	Суффозия и гравитационные процессы в покрывающих породах	–
Б2	Фильтрационное разрушение в восходящем потоке	При переходе к условиям типа Б1 становятся возможными любые виды карстово-суффозионных разрушений
В2	Фильтрационное разрушение покрывающих пород	При переходе к условиям типа В3–4 становится невозможным размывание покрывающих пород в нисходящем потоке
Г2	Фильтрационное разрушение покрывающих пород в восходящем потоке	При переходе к условиям типа Г3 становятся возможными любые виды карстово-суффозионных разрушений
В3–4	Фильтрационное разрушение покрывающих пород и их размывание нисходящим потоком	При переходе к условиям типа В2 становится возможным размывание покрывающих пород в нисходящем потоке
Г3	–	При переходе к условиям типа Г2 становится невозможным фильтрационное разрушение покрывающих пород в восходящем потоке. При переходе к условиям типа Г4 становится невозможным гидродинамическое разрушение покрывающих пород в нисходящем потоке
Г4	Гидродинамическое разрушение покрывающих пород в нисходящем потоке	При переходе к условиям типа Г3 становятся возможными любые виды карстово-суффозионных разрушений

ОБЪЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время прогнозирование развития карстово-суффозионных процессов, и в частности, карстово-суффозионного провалообразования, осуществляется главным образом на качественном уровне. Как правило, оно сводится к установлению на данной территории наличия или отсутствия условий, необходимых для развития определенного вида карстово-суффозионных разрушений. При региональном прогнозировании это выражается в виде составления карт районирования с выделением "опасных" и "неопасных" территорий (Дыховичный, Максименко, 1979). Вместе с тем одновременное наличие всех необходимых условий отнюдь не означает непременное возникновение карстово-суффозионных проявлений, поскольку при этом могут отсутствовать условия, достаточные для их формирования. Эти условия представляют собой такое сочетание параметров геологической среды (состояния и свойств покрывающих пород, их мощности, напоров и уровней подземных вод, интенсивности инфильтрации, размеров подземных карстовых форм и сквозных нарушений в водоупорах и т.д.), которое обеспечивает превышение разрушающих сил (гидростатического и гидродинамического давления, размывающей скорости, интенсивности динамического или ударного воздействия, веса пород и др.) над силами сопротивления пород разрушению.

В последние годы В.Н. Кожевниковой (1984) успешно разрабатывается методика регионального прогноза карстово-суффозионных процессов, основанная на комплексной оценке необходимых и достаточных условий их развития, которые автор методики предпочитает именовать основными условиями и факторами. В целом это прогнозирование носит качественный характер, несмотря на то, что в нем учитываются разрушающие факторы, имеющие четкое количественное выражение. В свою очередь, В.М. Кутепов (1983) предлагает оценивать устойчивость закарстованных территорий путем количественной характеристики напряженного состояния массивов горных пород с учетом техногенных воздействий. Автор не употребляет термина "карстово-суффозионные процессы", но в его расчетах отражены как необходимые, так и достаточные условия их развития. Разработанная В.М. Кутеповым методика чрезвычайно перспективна, но в настоящее время не может быть использована для прогноза некоторых разновидностей карстово-суффозионных разрушений.

В принципе, количественное прогнозирование карстово-суффозионных процессов может осуществляться с помощью нескольких групп методов, традиционно применяемых в инженерной геодинамике (Ломтадзе, 1977): стационарных наблюдений, аналогий, физического моделирования, вероятностно-статистических и расчетно-теоретических. Однако использование некоторых из них для данной цели затруднено рядом объективных причин, о чем следует сказать подробнее.

В инженерном карстоведении широко применяется метод количественной оценки провальной опасности с помощью показателя пространственно-временной интенсивности провалообразования (Рекомендации.., 1967). Числовые значения этого показателя в основном рассчитываются по данным, полученным в ходе стационарных наблюдений за формированием провалов. При этом обычно строятся региональные прогнозы провальной

опасности, как правило оформленные в виде карт районирования территорий по степени устойчивости (Саваренский, Миронов, 1978). Рассматриваемый метод, несмотря на некоторые, не лишенные оснований критические высказывания (Золотарев, 1983), в принципе может применяться для оценки карстово-суффозионной провальной опасности в тех случаях, когда в составе карстово-суффозионных процессов принимает активное участие растворение карстующихся пород. Но основная проблема, связанная с карстово-суффозионным провалообразованием, как раз и заключается в том, что оно очень часто проявляется в районах древнего затухшего карбонатного карста, и для него, как правило, характерно резкое возрастание интенсивности, не выражаемое стабильным показателем. Кроме того, при техногенной активизации карстово-суффозионного провалообразования на территориях, ранее считавшихся устойчивыми, прогнозист может не располагать необходимым отрезком времени для полноценных стационарных наблюдений, не говоря уже о том, что в крупных городах и промышленных центрах в силу ряда причин крайне затруднена регистрация провальных явлений.

В подобных ситуациях специалисты стараются привлечь на помощь методы аналогий, но эта группа прогнозных методов до сих пор используется в инженерном карстоведении в отличие от некоторых других направлений инженерной геодинамики только на качественном уровне. Применительно к прогнозированию карстово-суффозионных процессов метод аналогий, несомненно, имеет большую перспективу, но его использование предполагает, как минимум, существование объектов-аналогов. Для специалистов, изучающих карстово-суффозионные процессы, которые начали вызывать беспокойство у строителей только в последние десятилетия, в этом отношении могут возникнуть объективные трудности. Однако любопытно отметить, что уже сейчас некоторые исследователи обратили внимание на поразительную аналогию условий возникновения и параметров провалов, возможно карстово-суффозионного происхождения, образовавшихся вблизи Иоганнесбурга (ЮАР) и на окраине казахстанского города Кентау (Горшков, 1982).

Методы физического моделирования имеют огромное значение при исследовании процессов и явлений, скрытых от прямого наблюдения к числу которых относятся и карстово-суффозионные процессы. Физическое моделирование выступает при этом не только в роли прогнозного метода, но и в качестве незаменимого источника сведений о механизме карстово-суффозионных разрушений. Эти разрушения довольно широко изучались на лабораторных физических моделях в нашей стране (Архидьяконских, 1971; Девдариани, 1960; Лукин, 1964) и за рубежом (Nogushi Takahashi, Tokumitsu, 1970) применительно к различной природной обстановке. Однако обстоятельства сложились так, что экспериментальное изучение карстово-суффозионных процессов в лабораторных условиях началось с попытки решения сложных задач со значительными элементами неопределенности, связанными с наличием фильтрационных каналов в глинистых породах и локализованной инфильтрацией воды в зоне аэрации. Это привело к появлению пессимистических представлений о возможностях прогноза карстово-суффозионных процессов методами физического моделирования.

В последнее время широкое распространение получили вероятностно-статистические методы оценки карстовой, и в частности, карстово-суффозионной опасности (Толмачев, 1980). При этом широко используются статистические модели случайной величины, но до сих пор не нашли должного применения весьма перспективные модели случайных функций. Вероятностно-статистические методы в принципе не требуют знания механизма формирования тех явлений, параметры которых включаются в статистическую обработку, поэтому их очень удобно применять для прогноза карстово-суффозионных процессов, механизм которых изучен слабо. Это обстоятельство, впрочем, требует оговорки, поскольку корректная статистическая обработка применима только к генетически однородным данным. Именно поэтому в инженерном карстоведении уже давно назрела необходимость разработки принципов районирования карстоопасных территорий по механизму карстовых разрушений. В результате такого районирования выделяются условно однородные участки, в пределах которых и должна проводиться статистическая обработка данных о карстопроявлениях. Недостатком вероятностно-статистических методов является их непригодность для оценки ожидаемой карстоопасности, и это делает невозможным их применение для прогноза потенциально возможного техногенного карстово-суффозионного провалообразования. Кроме того, как уже отмечалось в связи с использованием стационарных наблюдений, в некоторых случаях можно не располагать достаточным числом представительных количественных данных о существующих карстово-суффозионных проявлениях.

Этих недостатков лишены расчетно-теоретические методы прогноза, но они требуют глубокого знания механизма прогнозируемых процессов. Применительно к оценке карстово-суффозионной опасности, их лучше всего сочетать с методами физического моделирования либо путем разработки теоретических решений на основе полученной на моделях качественной картины развития карстово-суффозионных разрушений, либо вводя статистически обработанные результаты моделирования в расчетные формулы в виде эмпирических коэффициентов. Для карстово-суффозионных процессов в целом детерминированные математические модели, лежащие в основе расчетно-теоретических прогнозных методов, практически не разработаны. Вместе с тем они построены для целого ряда природных и техногенных геологических процессов, которые могут рассматриваться как отдельные компоненты единой совокупности, объединяющей карстово-суффозионные разрушения. Так, например, существуют формулы, служащие для математического описания суффозионного размывания глинистых пород (Истомина, Буренкова, Мишурова, 1975), перемещения мелких частиц в поровом пространстве несвязных пород (Печеркин, Закоптелов, 1982), гравитационного сдвижения дисперсных пород (Насонов, 1969), формирования провальных воронок (Троицкий, Григорук, Хоменко, 1983) и некоторых других процессов. На основе этих формул, а также известных теоретических решений, разработанных в области механики грунтов и динамики подземных вод, возможно построение количественных прогнозов развития карстово-суффозионных разрушений.

Образование карстово-суффозионных провалов на территории Москвы

(Дыховичный, Максименко, 1979) показало, что на данном этапе хуже всего изучены карстово-суффозионные процессы, протекающие в несвязных покрывающих породах, при наличии в них постоянных водоносных горизонтов. Тем не менее именно этот тип карстово-суффозионных разрушений представляет собой наиболее доступный объект для прогнозирования с применением расчетно-теоретических методов в сочетании с физическим моделированием. Это связано с тем, что среда развития таких процессов (песчаные породы), с учетом их масштаба, как правило, обладает только ультранеоднородностью (Рац, 1973) и, следовательно, может рассматриваться как практически однородная среда. Динамика карстово-суффозионных процессов в значительной мере определяется динамикой освобождения карстовых полостей и трещин от заполнителя. В силу ряда объективных причин (Лыкошин, 1976) этот процесс изучен слабо, поэтому в настоящий момент возможно только построение безотносительных ко времени (Бондарик, 1972) количественных прогнозов карстово-суффозионного провалообразования, рассчитанных для наименее благоприятных условий (на экстремальный случай).

ЛАБОРАТОРНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Карстово-суффозионные процессы, протекающие в дисперсных покрывающих породах при наличии в них постоянных водоносных горизонтов, проявляются главным образом в виде фильтрационного разрушения и подземного гравитационного сдвижения. Проблема имитации таких процессов с помощью физических моделей состоит в том, что в силу различной физико-механической природы фильтрационного разрушения песков и подземного обрушения глинистых пород, слагающих промежуточные водоупоры, их совместное воспроизведение на одной модели крайне затруднительно, если вообще возможно. В лучшем случае при этом можно получить только качественную картину. Отсюда возникает необходимость применения различных методов лабораторного физического моделирования двух упомянутых разновидностей карстово-суффозионных рузрушений.

Имитация фильтрационного разрушения водонасыщенных песчаных пород, перекрывающих карстовые трещины и полости, осуществлялась путем лоткового моделирования, так как другие известные и широко применяемые физические, гидрогеологические модели (гидро- и электроинтеграторы, ЭГДА и др.) воспроизводят фильтрационные процессы, протекающие в недеформируемых средах. Для решения поставленной задачи была выбрана прямоугольная конструкция лотка, поскольку в условиях, когда механизм изучаемых процессов неясен и можно получить ценную информацию в ходе визуальных наблюдений за их развитием, целесообразно использовать "плоские" модели с прозрачной стенкой.

Для моделирования обрушения слоя слабопроницаемых глинистых пород над зонами фильтрационного разрушения лежащих ниже песков использовался метод эквивалентных материалов. Преимущества этого

способа моделирования гравитационных процессов применительно к изучению карстово-суффозионных разрушений по сравнению с другими методами (центробежного моделирования, фотоупругости, тензосетки) заключается в простоте и наглядности. При этом, так же как и в предыдущем случае и по тем же самым причинам, целесообразно применение "плоских" моделей.

Если в первом случае мы сталкиваемся с полным отсутствием аналитических решений задач, связанных с фильтрационным разрушением водовмещающих пород покрывающей толщи в ходе развития карстово-суффозионных процессов, то для разрушения глинистого слоя, перекрывающего растущую карстовую полость, такое решение имеется (Альбов, 1948). В связи с этим может возникнуть сомнение в необходимости физического моделирования процессов подобного рода.

Тем не менее в данном случае такая необходимость существует и связана с тремя причинами.

1. В основе построений С.В. Альбова лежит теория В.Д. Слесарева, базирующаяся на аналогии между деформированием слоя пород, перекрывающего горную выработку, и работой закрепленной или не закрепленной на опорах упругой балки, т.е. на аналогии не совсем правомерной для пластичных глинистых пород.

2. Как будет подробно показано в дальнейшем, форма суффозионной воронки, с которой связан прогиб лежащего выше глинистого слоя, отнюдь не соответствует форме карстовой полости и тем более горной выработки.

3. Формулы В.Д. Слесарева содержат трудноопределимый для дисперсных пород показатель – сопротивление разрыву.

При моделировании обрушения слабопроницаемого глинистого слоя наибольшую трудность представляет проблема воспроизведения на "сухой" модели из эквивалентных материалов суффозионного выноса песков, подстилающих глинистый слой, поскольку методика такого моделирования не допускает применения "мокрой" технологии. Однако существование экспериментально доказанной аналогии между гравитационным истечением сухого песка и фильтрационным разрушением водонасыщенных песчаных пород в нисходящем потоке позволило решить эту задачу, используя сыпучие свойства сухих песков. В настоящее время имеется положительный опыт применения подобной технологии при лабораторном моделировании карстовых разрушений (Давыдько, 1975; Jennings, 1966).

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Экспериментальная установка для моделирования фильтрационных разрушений (рис. 7) представляет собой прямоугольный фильтрационный лоток, состоящий из рабочей камеры, заполняемой материалом модели, и двух боковых водоприемных камер, отделенных от рабочей выдвижными фильтрами и снабженных устройствами для поддержания в них определенных уровней воды. Установка отличается от обычного прямоугольного лотка (Жернов, Павловец, 1976) наличием дополнительной нижней водоприемной камеры, имеющей устройство для поддержания в ней определенного напора воды (Хоменко, 1981). Между нижней водоприемной

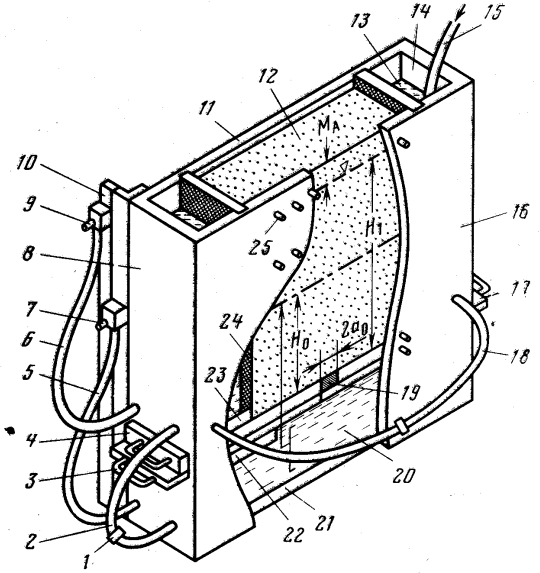


Рис. 7. Конструкция экспериментальной установки для лабораторного моделирования фильтрационных разрушений (вид сзади с частичным вырезом задней стенки)

1 – зажим; *2* – соединительный шланг правой боковой и нижней водоприемных камер; *3* – рукоятка; *4* – выдвижная водоупорная пластина; *5* – выпускной шланг нижней водоприемной камеры; *6* – выпускной шланг правой боковой водоприемной камеры; *7* – выпускной штуцер нижней водоприемной камеры; *8* – боковая стенка; *9* – выпускной штуцер правой боковой водоприемной камеры; *10* – градуированные направляющие для перемещения выпускных штуцеров; *11* – передняя стенка; *12* – рабочая камера, заполненная материалами модели; *13* – вода; *14* – левая боковая водоприемная камера; *15* – система подачи воды; *16* – задняя стенка; *17* – выдвижная опорная пластина; *18* – соединительный шланг боковых водоприемных камер; *19* – утяжеленная вставка; *20* – нижняя водоприемная камера, заполненная водой; *21* – дно; *22* – опорная перемычка; *23* – водоупорная перемычка; *24* – выдвижной фильтр; *25* – выходной штуцер, соединяемый с пьезометром

и рабочей камерами размещена водоупорная система, состоящая из выдвижных опорных пластин, на которых установлены выдвижные водоупорные пластины и утяжеленная вставка.

Опытный образец установки размером 108 × 91 × 20 см^3 выполнен из оргстекла с отдельными металлическими деталями. Размеры его рабочей камеры составляли 80 × 71 × 15 см^3. Выдвижные фильтры – плоские полые ящики с перфорированными стенками – заполнены крупным гравием. Фильтрационная установка была снабжена системой пьезометров, расположенных на специальном щите и соединенных посредством резиновых шлангов с выходными штуцерами. В рабочей камере расположено 35 таких штуцеров. Прозрачная передняя стенка установки позволяла вести качественное фото- и кинодокументирование хода эксперимента.

Стенд для моделирования обрушения промежуточных водоупоров (рис. 8) представляет собой жесткую прямоугольную раму, состоящую из днища и торцовых стенок, на которой закреплены съемная передняя

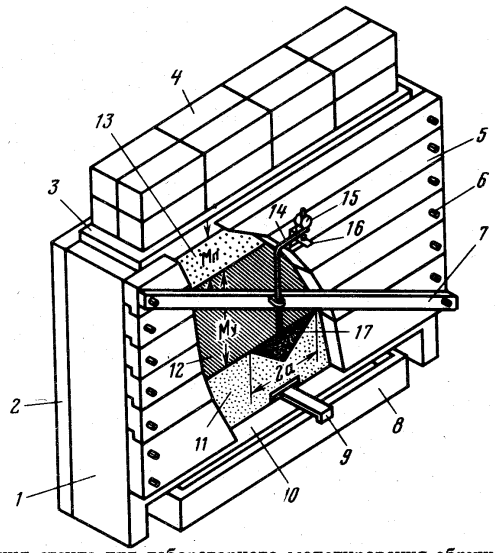


Рис. 8. Конструкция стенда для лабораторного моделирования обрушения промежуточных водоупоров (вид сзади с частичным вырезом задней стенки)

1 – торцевая стенка; *2* – передняя стенка; *3* – доска для размещения дополнительной нагрузки; *4* – дополнительная нагрузка; *5* – съемная доска задней стенки; *6* – крепежный болт; *7* – ребро жесткости; *8* – приемный ящик для высыпающегося сухого песка; *9* – выпускное устройство; *10* – днище; *11* – бункер, заполненный сухим песком; *12* – слой эквивалентного материала; *13* – пригрузка; *14* – поворотный кронштейн; *15* – индикатор часового типа; *16* – индикаторная пластина; *17* – воронкообразная полость

и разборная задняя стенки. Отличительная черта стенда – наличие в его нижней части бункера для сухого песка и специального устройства, предназначенного для его порционного или непрерывного выпуска.

Внутреннее пространство стенда с габаритами 100 × 56 × 10 см^3 заполнялось слоем сухого мелкого (фракции размером менее 0,25 мм) песка высотой 21 см, слоем эквивалентного материала и слоем пригрузки, в качестве которой использовался крупный влажный песок, перекрытый сверху доской с равномерно распределенным грузом массой 56 кг. Рама стенда сварена из швеллерной стали. К ней с помощью болтов крепились передняя прозрачная стенка из оргстекла и задняя стенка, собираемая из семи деревянных, пропитанных олифой досок, и усиленная уголковым ребром жесткости. Две нижние доски были сделаны несъемными и неразъемными во избежание нежелательных утечек сухого песка через неплотные стыки. Выпускное устройство выполнено из листовой нержавеющей стали и дюралюминия.

Стенд применялся и для проведения контрольных опытов, моделирующих гравитационное обрушение песков зоны аэрации, Для этого нижняя часть стенда, предназначенная для размещения сухого песка, перекрывалась опорной доской, а с задней стенки убиралось уголковое ребро

жесткости. Имитация растущей полости осуществлялась с помощью набора одинаковых деревянных брусков толщиной 0,5 см. Все остальные конструктивные элементы оставались прежними.

В качестве контрольного прибора применялась поворотная пластина, предназначенная для определения сопротивления сдвигу (скольжению) песка по оргстеклу. Измерительным прибором в ходе эксперимента служил индикатор часового типа, опиравшийся на свободный конец стальной пластины, погруженной в тело модели и выступающей через окно в задней стенке. Визуальное наблюдение и фотодокументирование хода опытов осуществлялось через прозрачную переднюю стенку стенда.

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование на фильтрационной установке в принципе проводилось так же, как и на любом прямоугольном фильтрационном лотке (Жернов, Павловец, 1976), но в то же время имело некоторые особенности, обусловленные конструкцией экспериментального оборудования. В целом работы, связанные с проведением отдельно взятого эксперимента, всегда состоят из двух частей: подготовки опыта и его непосредственного проведения.

Подготовка опыта начиналась с заполнения водой нижней водоприемной камеры, после чего производилась сборка водоупорной системы. В ходе сборки вначале в горизонтальные пазы передней и задней стенок через сквозные окна в боковых стенках с двух сторон вставлялись водоупорные и опорные пластины. Они закладывались таким образом, чтобы с одной стороны торцы выдвижных пластин находились в одной плоскости, а с противоположной стороны опорная пластина выступала из-под водоупорной пластины на ширину утяжеленной вставки. После этого все выдвижные пластины сдвигались к центру до упора торцов опорных пластин друг в друга, а в зазор между торцами водоупорных пластин вкладывалась утяжеленная вставка, занимающая центральное положение (рис. 9, *а*). Вставка подбиралась в соответствии с условиями эксперимента из имеющегося набора и в дальнейшем определяла ширину отверстия в водоупоре.

Затем производилось заполнение рабочей камеры материалами модели на необходимую высоту способом укладки отдельных увлажненных слоев толщиной 7–10 см, с уплотнением каждого слоя тяжелой ручной трамбовкой и разрыхлением его поверхности перед закладкой очередного слоя. После этого материал насыщался водой через боковые водоприемные камеры путем медленной ее подачи и постепенного подъема уровня в камерах до необходимой отметки. В дальнейшем уровень воды в боковых камерах поддерживался автоматически с помощью сосудов Мариотта и выпускного штуцера. В ходе насыщения материалов модели соединительные шланги между боковыми камерами и между нижней и боковой камерой оставались открытыми; по окончанию насыщения последний шланг перекрывался зажимом. На этом подготовка эксперимента заканчивалась.

Опыт начинался созданием сквозного нарушения в водоупоре. Для этого за рукоятку выдергивалась выдвижная опорная пластина, на которой была установлена утяжеленная вставка, после чего она падала на дно нижней камеры (рис. 9, *б*). Наблюдавшиеся при этом явления тщательно документировались, однако в определенных условиях, при отсутствии разни-

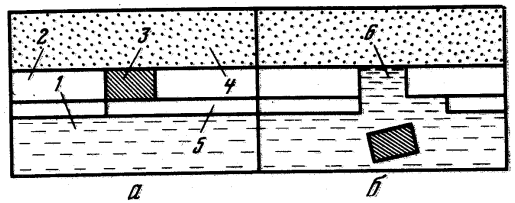


Рис. 9. Устройство и принцип действия водоупорной системы установки для моделирования фильтрационных разрушений

1 – нижняя водоприемная камера, заполненная водой; *2* – водоупорная пластина; *3* – утяжеленная вставка; *4* – рабочая камера, заполненная материалом модели; *5* – опорная пластина; *6* – сквозное нарушение

цы между напором воды в нижней камере и уровнем в боковых, может не отмечаться никаких деформаций. В этом случае опыт продолжался путем снижения напора воды в нижней камере вплоть до нулевой отметки соответствующей поверхности водоупорных пластин. Напор снижался ступенями через 1 см, причем каждая ступень выдерживалась до стабилизации расхода воды, вытекающей из выпускного штуцера нижней камеры, и уровней в трубках пьезометров, т.е. до установления режима стационарной фильтрации. Обычно это время не превышало 15 мин. Значения напоров воды в нижней камере, при которых отмечались какие-либо деформации материала модели, фиксировались, а сам ход разрушения документировался в специальном журнале. Эксперимент завершался выпуском воды из всех водоприемных камер, разгрузкой рабочей камеры, извлечением выпавшей утяжеленной вставки и очисткой от песка нижней водоприемной камеры.

Моделирование на эквивалентных материалах имеет хорошо разработанную технологию (Кузнецов и др., 1968) и в настоящее время успешно применяется для решения задач инженерного карстоведения (Давыдько, Толмачев, 1977б; Мартин, Травкин, 1979). Тем не менее в рассматриваемом случае эксперимент имеет ряд специфических черт, связанных с аналоговым воспроизведением на модели фильтрационного разрушения песков в нисходящем потоке.

Первой операцией, связанной с подготовкой опыта, явилось заполнение нижней части стенда сухим песком, поверхность которого тщательно выравнивалась. Выпускное устройство при этом было закрыто, а задняя стенка стенда (кроме ее нижней части) – разобрана. Затем на поддоне из оргстекла в специальной скользящей опалубке с внутренней градуировкой производилась формовка слоя, имитирующего водоупор определенной мощности, после чего слой освобождался от опалубки и переносился на поддоне в стенд. Вслед за этим слой эквивалентного материала прижимался доской задней стенки, поддон выдергивался и слой ложился на поверхность сухого песка. После этого производилась сборка и крепление задней стенки стенда, а на слой эквивалентного материала укладывалась песчаная пригрузка на всю оставшуюся высоту стенда. Слой пригрузки перекрывался сверху доской, на которой устанавливался груз в виде стальных гирь. Спустя некоторое время в пригрузочный слой вводилась

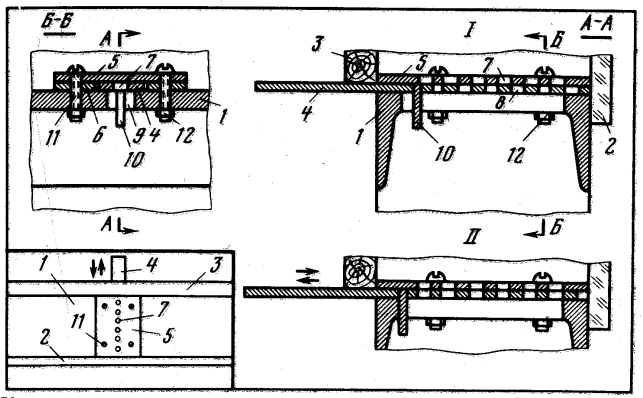


Рис. 10. Конструкция и принцип действия устройства для выпуска сухого песка при моделировании обрушения промежуточных водоупоров

I – в закрытом положении; *II* – в открытом положении; *1* – днище стенда; *2* – передняя стенка стенда; *3* – задняя стенка стенда; *4* – выдвижная заслонка; *5* – крышка; *6* – опорные прокладки; *7* – отверстие в крышке; *8* – отверстие в заслонке; *9* – сквозной паз в днище стенда; *10* – шток-ограничитель; *11* – винт; *12* – гайка

стальная пластина, на свободном конце которой устанавливался индикатор закрепленный на поворотном кронштейне.

Для того чтобы начать эксперимент, выпускное устройство (рис. 10) открывалось перемещением заслонки, чем обеспечивалось истечение сухого песка через отверстия. При этом непосредственно под слоем эквивалентного материала начинала формироваться воронкообразная полость (см рис 8), рост которой регулировался выпускным устройством: при его закрытом положении истечение песка прекращалось. Увеличение размера полости производилось ступенями (за одну ступень ее полуширина увеличивалась на 1 см) до тех пор, пока не происходило полное разрушение слоя эквивалентного материала. В ходе опыта в специальном журнале производилась фиксация размеров воронкообразной полости, при которых начиналось развитие деформаций в эквивалентном материале. Эти деформации могут выявляться с помощью индикатора или наблюдаться визуально. По окончании опыта со стенда снималась пригрузка, производилась разборка его задней стенки и очистка его внутреннего пространства от пригрузочного песка и эквивалентного материала.

Для осуществления контрольных опытов по изучению гравитационного обрушения влажных песков стенд освобождался от сухого песка, его нижняя часть перекрывалась опорной доской, которая теперь служила днищем, а свободная часть опорной доски заполнялась деревянными брусками. Бруски удалялись один за другим, начиная с центрального, и, таким образом, под влажными песками постепенно росла полость до тех пор, пока не происходило их обрушение. Такое решение ранее уже применялось В.В. Толмачевым и Р.Б. Давыдько (Давыдько, Толмачев, 1977а) при моделировании карстового провалообразования, но в их опытах шаг расширения полости составлял не 0,5, а 2,0 см. Закладка материала модели производилась точно так же, как и закладка песчаной пригрузки.

Контрольные определения сопротивления сдвигу песка по оргстеклу проводились с помощью поворотной пластины, на которую помещалась гильза, заполненная влажным песком. Угол наклона пластины постепенно увеличивался до момента соскальзывания гильзы, после чего она утяжелялась с помощью пригрузки и опыт повторялся вновь. На основе данных о весе гильзы с песком и пригрузкой и критических углах наклона пластины из оргстекла производился расчет коэффициента трения методом разложения сил.

МАТЕРИАЛЫ МОДЕЛЕЙ

Материалы фильтрационных моделей были представлены песками трех типов: крупными, средней крупности и мелкими, согласно градации, принятой в практике инженерно-геологических изысканий (Справочник ..., 1981). В соответствии с этим проводились три серии экспериментов под индексами К, С и М. Крупные пески обладали наибольшей пестротой минерального состава и наименьшей окатанностью по сравнению с песками средней крупности и мелкими. Другие данные о гранулометрическом составе и свойствах песков, служивших материалами моделей, приведены в табл. 2. Значения коэффициента сортировки, по П.И. Фадееву (1974), свидетельствуют о том, что наибольшей однородностью зернового состава отличались пески средней крупности.

Водопроницаемость песков определялась расчетным путем по данным о напорах и расходах воды, полученным в ходе опытов, в интервалах протекания фильтрации по линейному закону, т.е. до начала каких-либо фильтрационных разрушений, а плотность оценивалась путем отбора проб режущими кольцами из рабочей камеры на разной глубине от поверхности, для чего производились контрольные укладки материала. Коэффициенты пористости песков несколько уменьшались с глубиной, но в целом, согласно критериям, принятым при изысканиях (Справочник ..., 1981), материалом моделей во всех сериях опытов служили пески средней плотности, близкие к плотному состоянию.

Эквивалентные материалы, предназначенные для имитации пластичных глинистых пород четвертичного возраста, подбирались в первую очередь с учетом общих требований, предъявляемых к эквивалентным материалам (Rosenblad, 1972): экономичность и простота изготовления в сочетании с доступностью составных частей и возможностью многократного использования. Кроме того, при их выборе преследовались такие чисто специфические цели, как сохранение свойств материала неизменными в течение нескольких часов и возможность получения максимально широкого диапазона параметров материала при различных сочетаниях исходных компонентов.

Согласно данным, приведенным в фундаментальной работе английского исследователя Б. Стимпсона (Stimpson, 1970), в мире накоплен огромный опыт использования разнообразных эквивалентных материалов, служащих для решения различных прикладных задач. В Дзержинской карстовой лаборатории ПНИИИСа в целях изучения на моделях процесса обрушения кровли карстовой полости, перекрытой глинистыми породами, для их имитации успешно применяются механические смеси мелкого песка, молотой слюды и порошкообразной бентонитовой глины с жидкими маслами. Такие смеси, представляющие собой, согласно классификации Б. Стимпсона, зернистые материалы, сцементированные маслами (oil – cemented gratular materials), вполне удовлетворяют указанным выше требованиям, поэтому в качестве эквивалентного материала были выбраны четырехкомпонентные смеси песка, слюды, глины и масла.

Таблица 2. Свойства материалов фильтрационных моделей

Материал	Характерные диаметры, мм			Коэффициент сортировки $\frac{d_{90}}{d_{10}}$	Угол естественного откоса $\frac{\alpha_c*}{\alpha_b}$	Коэффициент пористости e	Коэффициент фильтрации $K_ф$, м/сут (среднее значение и пределы изменения)
	d_{10}	d_{50}	d_{90}				
Пески крупные	0,28	0,63	2,43	8,7	$\frac{34°}{31°}$	0,55–0,63	50 (44–94)
Пески средней крупности	0,16	0,36	0,56	3,5	$\frac{34°}{32°}$	0,56–0,64	22 (15–31)
Пески мелкие	0,07	0,17	0,39	5,6	$\frac{35°}{32°}$	0,64–0,65	10 (3–14)

* В числителе – в сухом состоянии, в знаменателе – под водой.

Такие смеси тем не менее можно рассматривать как трехкомпонентные, поскольку масло в данном случае не является самостоятельной составной частью, а всего лишь играет роль вяжущего. В соответствии с этим в качестве отдельного самостоятельного компонента смеси выступает уже не песок, глина или слюда в чистом виде, а один из трех зернистых материалов, смешанных с определенным количеством масла. Процентное соотношение вяжущего и твердой составляющей подбиралось для каждой из ее трех разновидностей опытным путем так, чтобы получалась смесь, похожая на глинистую породу туго- или мягкопластичной консистенции.

В качестве вяжущего было выбрано трансформаторное масло марки ТАП-15, а в качестве зернистых материалов – сухая порошкообразная бентонитовая глина, мелкий кварцевый песок (фракция 0,10–0,25 мм) и молотый мусковит, крупностью около 0,3 мм. Весовой процентный состав трех исходных компонентов, служащих для создания эквивалентных материалов, выглядел следующим образом: компонент 1–75% глины и 25% масла; компонент 2 – 89% песка и 11% масла; компонент 3 – 60% слюды и 40% масла.

Подбор состава трехкомпонентного эквивалентного материала с целью получения необходимых значений его свойств осуществлялся с помощью графиков-треугольников, на которые наносились линии равных значений плотности материала и показателей его сопротивления сдвигу (рис. 11). Для построения таких графиков использовался математический аппарат симплекс-решетчатого планирования. Его применение основано на положе-

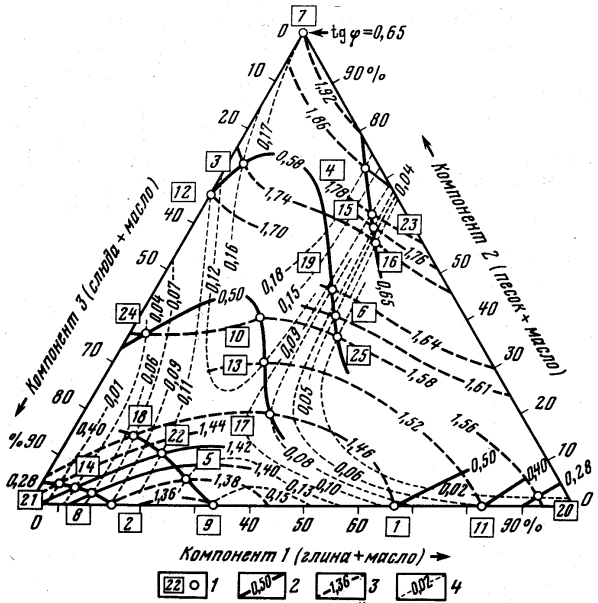


Рис. 11. Совмещенные графики зависимости свойств эквивалентных материалов от их весового состава, отстроенные методом симплекс-решетчатого планирования

1 – номер опыта и состав эквивалентного материала; *2* – изолиния коэффициента внутреннего трения; *3* – изолиния плотности, 10^3 кг/м^3; *4* – изолиния удельного сцепления, 10^5 Па

Таблица 3. Состав и свойства эквивалентных материалов (матрица симплекс-решетчатого планирования)

Процентное содержание компонентов			Свойства эквивалентного материала		
Компонент 1 (глина + + масло)	Компонент 2 (песок + + масло)	Компонент 3 (слюда + + масло)	Плотность ρ, 10^3 кг/м^3	Удельное сцепление С, 10^5 Па	Коэффициент внутреннего трения, tg φ
100	0	0	1,58	0,10	0,100
0	100	0	1,92	0,17	0,650
0	0	100	1,43	0,00	0,200
33,3	66,7	0	1,86	0,05	0,700
33,3	0	66,7	1,36	0,15	0,400
0	33,3	66,7	1,57	0,00	0,500
66,7	33,3	0	1,66	0,00	0,700
66,7	0	33,3	1,46	0,10	0,500
0	66,7	33,3	1,70	0,11	0,575
33,3	33,3	33,3	1,54	0,08	0,525

нии, согласно которому свойство материала является функцией его состава и может быть аналитически выражено в виде полинома некоторой степени от нескольких переменных, количество которых равно количеству исходных компонентов материала (Чемлева, Микешина, 1969). Свойства рассматриваемых эквивалентных материалов с достаточной точностью описываются полиномами третьей степени и для простого расчета коэффициентов этих полиномов достаточно определить свойства десяти смесей специально подобранного состава. Такие данные были получены, при этом плотность материала определялась методом режущих колец, а сдвиговые испытания осуществлялись на приборе ГГП-30 по схеме ускоренного сдвига. Результаты представлены в табл. 3.

Отдельно следует остановиться на материале пригрузки, по сути дела, также представляющем собой эквивалентный материал, предназначенный для имитации песчаных пород, перекрывающих промежуточный водоупор. В силу ряда соображений, о которых будет сказано в дальнейшем, материал подбирался таким образом, чтобы он имел минимальное удельное сцепление и не очень большой угол внутреннего трения. Этим требованиям отвечают крупные пески, применявшиеся в качестве материала фильтрационной модели (см. табл. 2) при условии их рыхлой укладки. Относительная влажность песков пригрузки изменялась от 3,4 до 4,8%, плотность – от 1,50 до 1,57 т/м^3, коэффициент пористости – от 0,76 до 0,83. Коэффициент трения песка об оргстекло составил 0,404.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Фильтрационные (лотковые) модели воспроизводили песчаную покрывающую толщу, содержащую постоянный безнапорный горизонт грунтовых вод и залегающую на водоупорном слое, в котором внезапно возникало нарушение сплошности в виде сквозной щели. Нарушение создавало гидравлическую связь между надкарстовыми и трещинно-карстовыми водами, горизонт которых располагался под водоупорным слоем, и имело ширину, исключающую гравитационное обрушение расположенных непосредственно над ним водонасыщенных песков. В природной обстановке это соответствует появлению в водоупоре сквозных трещин.

Общий замысел экспериментов предполагал изменение от опыта к опыту следующих параметров (см. рис. 7): 1) вида песка и его свойств; 2) мощности зоны аэрации M_a; 3) ширина щели в водоупоре $2a_0$; 4) мощности зоны насыщения H_1; 5) пьезометрического напора трещинно-карстовых вод, который характеризуется величиной H_0. Каждый опыт начинался образованием щели в водоупоре либо в условиях равенства величин H_0 и H_1, либо при более низком положении отметки напора воды в нижней камере. Если при этом не отмечалось каких-либо деформаций в песчаном слое, опыт продолжался путем дискретного снижения напора воды в нижней камере с фиксацией его критических значений. Первые четыре параметра оставались неизменными в ходе отдельного опыта.

Эксперименты были спланированы по мобильной классической схеме (Шенк, 1972). Это объясняется тем, что рассматриваемые экспериментальные исследования в значительной мере носили характер поиска, а наблюдаемые явления отличались большим разнообразием и развивались только в

определенных диапазонах исходных параметров, которые заранее не были известны, т.е. до эксперимента отсутствовали данные о его рабочей области. Выбранные планы позволяли оперативно отстраивать рабочие графики различных зависимостей и на основе их анализа осуществлять контроль за ходом эксперимента и корректировку самих планов.

Опыты серии С были проделаны без ограничений параметров. На основе полученных зависимостей и выявленных граничных условий составлялись планы опытов для серий К и М с практически полным заполнением рабочей области. При этом в ходе опытов производилась корректировка планов с отбраковкой значений, выходящих за границы, интересующие экспериментатора. Следует отметить, что несколько опытов не были связаны с какими-либо планами, а носили либо пробный, либо демонстрационный характер, в частности, четыре опыта были специально подготовлены для кинодокументирования. Некоторые опыты повторялись при данных условиях, но перед проведением эксперимента заранее задавалась разница между уровнем воды в боковых камерах и напором воды в нижней. Таким образом, выявлялась роль пьезометрического напора трещинно-карстового водоносного горизонта. В целом, принятая схема планирования экспериментов вполне себя оправдала и значительно упростила последующую обработку опытных данных. Всего на фильтрационной установке был проведен 71 опыт.

Модели из эквивалентных материалов имели трехслойное строение, причем каждый из слоев выполнял свою, строго определенную функцию. Слой сухого песка имитировал водоносные песчаные породы, слой эквивалентного материала – промежуточный водоупор, а слой влажных песков – песчаную толщу, перекрывающую слабопроницаемые породы (см. рис. 8).

При всех отличиях процесса гравитационного истечения сухого песка через отверстие от процесса фильтрационного разрушения водонасыщенных песков в нисходящем потоке имеется большое сходство в морфологии форм, возникающих в обоих случаях на поверхности массива. Это обстоятельство позволило воспроизводить на моделях из эквивалентных материалов процесс формирования и роста суффозионной полости (воронки) в основании водоупорного слоя.

Материал пригрузки, представленный влажными песками, служил вторым вспомогательным материалом моделей. Одновременно он являлся и основным материалом, поскольку процесс гравитационного обрушения глинистого слоя над какой-либо подземной полостью тесно связан с обрушением лежащих выше пород (Альбов, 1948). Этот материал был подобран так, чтобы критический пролет полости, над которой происходит его первое обрушение, имел минимальную величину, а своды обрушения – минимальную высоту, что в соответствии с теорией М.М. Протодьяконова (Насонов, 1969) достигается малыми величинами удельного сцепления и угла внутреннего трения пород. Как будет показано в дальнейшем, соблюдение этого требования позволило значительно расширить рабочую область эксперимента. Для того чтобы свести к минимуму искажения, связанные с зависимостью параметров сводов обрушения от глубины расположения их оснований (обстоятельство, также вытекающее из теории Протодьяконова), были созданы дополнительные напряжения в массиве за счет пригрузки стальными гирями. Это дает возможность пренебречь влиянием на ход

эксперимента такого фактора, как мощность песчаного слоя, перекрывающего глинистые породы. Специальными экспериментальными исследованиями (Давыдько, Толмачев, 1977а) была доказана правомерность подобной постановки вопроса.

Влажные пески, перекрывающие слой эквивалентного материала, способны при определенных обстоятельствах качественно воспроизводить и водонасыщенные песчаные породы. Это связано с тем, что, как показали специальные опыты (Толмачев, Карпов, Хоменко и др., 1982), в водонасыщенных песках в случае обрушения кровли полости, над которой они залегают, и при отсутствии напора воды в лежащем ниже водоносном горизонте формируются устойчивые своды обрушения, подобные сводам во влажных песках. Это сходство все более растет с ростом пролета полости, в которую происходит обрушение песков.

Эквивалентный материал, воспроизводящий в определенном масштабе глинистые породы промежуточного водоупора, являлся главным рабочим материалом модели. Опыты предусматривали изменение основных параметров этого слоя (см. рис. 8): мощности M_y, удельного веса слагающих его пород γ_y, их удельного сцепления C_y и угла внутреннего трения φ_y. В ходе отдельного опыта имитировался рост суффозионной воронки в основании водоупорного слоя, и в связи с этим дискретно росла ширина ее верхней части $2a$ от нуля до величины, обеспечивающей полное разрушение водоупора ($2a_p$).

Общая картина последовательного развития гравитационных деформаций глинистого слоя над растущей подземной полостью в настоящее время достаточно хорошо известна, и проделанные опыты не открыли в этом смысле ничего нового. Это обстоятельство в сочетании с основной целью экспериментов – получением аналитической зависимости натурных критических величин пролетов суффозионных воронок от свойств естественных пород, слагающих водоупорный слой, и от его истинной мощности – сделало возможным применение факторного плана экспериментальных работ со всеми его преимуществами (Шенк, 1972).

Составление факторного плана для рассматриваемых экспериментов представляло собой многошаговую процедуру с постоянной корректировкой, сложность которой дополнительно усугублялась двумя обстоятельствами: наличием вполне определенных масштабных соотношений между параметрами натуры и модели и вполне определенным сочетанием свойств эквивалентного материала конкретного состава. В связи с этим на факторное планирование дополнительно наложилось планирование симплекс-решетчатое. В целом же план экспериментальных работ был разработан с учетом следующих положений.

1. Свойства эквивалентного материала и глинистой породы натуры, воспроизводимой на модели, связаны с линейным масштабом моделирования следующими безразмерными критериями (Кузнецов и др., 1968):

$$C_M/(\gamma_M L_M) = C_N/(\gamma_N L_N), \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\varphi_M = \operatorname{tg}\varphi_N, \quad (2)$$

где C_M и C_N – удельное сцепление материала модели и пород натуры; φ_M, φ_N – соответствующие углы внутреннего трения; γ_M, γ_N – соответ-

ствующие удельные веса; L_M, L_N – соответствующие линейные размеры.

Для песчаных пород сохраняется только второй критерий подобия. Если модель состоит из двух или нескольких материалов, для всех слоев должно соблюдаться условие:

$$\gamma_M/\gamma_N = \text{const}. \qquad (3)$$

2. Поскольку, согласно формуле (2), коэффициент внутреннего трения является единственной независимой величиной, диапазон его значений должен выбираться, только исходя из реальных возможностей эквивалентного материала.

3. Взаимозависимые по критериям подобия величины удельного веса и удельного сцепления для натурных глинистых пород четвертичного возраста выбирались на основе региональных таблиц инженерно-геологических свойств грунтов Русской платформы (Инженерная геология СССР, 1978) с учетом возможностей эквивалентного материала.

4. В соответствии с принципами симплекс-решетчатого планирования, взаимное сочетание свойств материалов, предназначенных для конкретных опытов, должно подбираться аналитически или, что намного проще и нагляднее, графически – наложением друг на друга диаграмм состав–свойство (см. рис. 11).

5. Граничные значения мощности слоя эквивалентных материалов целесообразно подбирать путем проведения предварительных экспериментов. Нижняя граница определяется минимальной мощностью, при которой ширина основания свода обрушения в песках пригрузки практически равна критическому пролету, а верхняя – такой мощностью слоя, при которой, вплоть до полного его разрушения, не наблюдается внутренних вывалов, способных внести искажения в общую для всех опытов картину развития деформаций.

В соответствии с существующей методикой факторного планирования экспериментов (Протодьяконов, Тедер, 1970) и с учетом изложенных соображений был разработан план, потребовавший проведения 25 опытов. Кроме того, дополнительно проводились 5 контрольных опытов, связанных с выяснением некоторых характеристик песков пригрузочного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование фильтрационного разрушения водонасыщенных песков показало, что карстово-суффозионные процессы, протекающие в данной природной обстановке, представляют собой комплекс элементарных процессов-компонентов, развитие которых приводит к формированию неустойчивых, заполненных водой, и устойчивых, не заполненных водой полостей, а также четко ограниченных зон перемещения песчаных пород. Подобные формы наблюдались как в водонасыщенных песках (в зоне насыщения), так и во влажных (в зоне аэрации). В определенных условиях эти формы выходили на поверхность массива в виде провалов и суффозионных воронок.

В отдельных случаях при внезапном образовании сквозного нарушения в водоупоре в водонасыщенных песках наблюдалось формирование неустойчивых, заполненных водой полостей (рис. 12). Анализ экспериментальных данных показал, что подобные полости могут возникать только при наличии определенного пьезометрического напора воды в нижней камере, превышающего некоторую критическую величину в данных условиях. При $H_0 = 0$ развитие данного процесса полностью исключается, но он вполне способен протекать при равенстве величин H_0 и H_1.

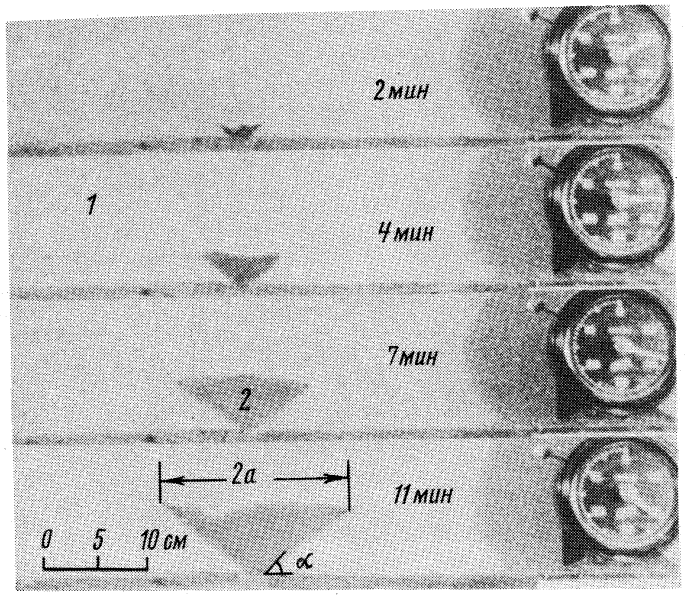


Рис. 12. Фотограмма роста полости разжижения

1 – **водонасыщенный песок**; *2* – **полость разжижения**; *3* – **влажный песок**; *4* – **полость обрушения**; *5* – **зона гравитационного сдвижения**; *6* – **зона фильтрационного разрушения**; *7* – **суффозионная полость**

Неустойчивая полость в разрезе имеет вид перевернутого равнобедренного треугольника, упирающегося вершиной в сквозное нарушение в водоупоре, и ограничена с боков наклонными плоскостями, а сверху очень зыбкой и неустойчивой поверхностью с переменной конфигурацией, но в целом близкой к горизонтальной плоскости. Рост полости протекает дискретно: вначале образуется полость малой высоты с крутыми стенками и почти горизонтальной верхней границей, которая постепенно выгибается вверх и начинает напоминать параболу, после чего боковые границы полости выполаживаются до определенного, несколько меньшего угла откоса. Затем все повторяется вновь, вплоть до формирования полости с критическим пролетом ее верхней части, в результате чего происходит ее разрушение путем блокового гравитационного сдвижения песка, расположенного над полостью, например, таким образом, как это показано на рис. 13.

Морфология неустойчивых полостей, динамика их роста, а также быстрый подъем уровня воды в ближайшем к полости пьезометре свидетельствуют о том, что формирование таких полостей связано с процессом пол-

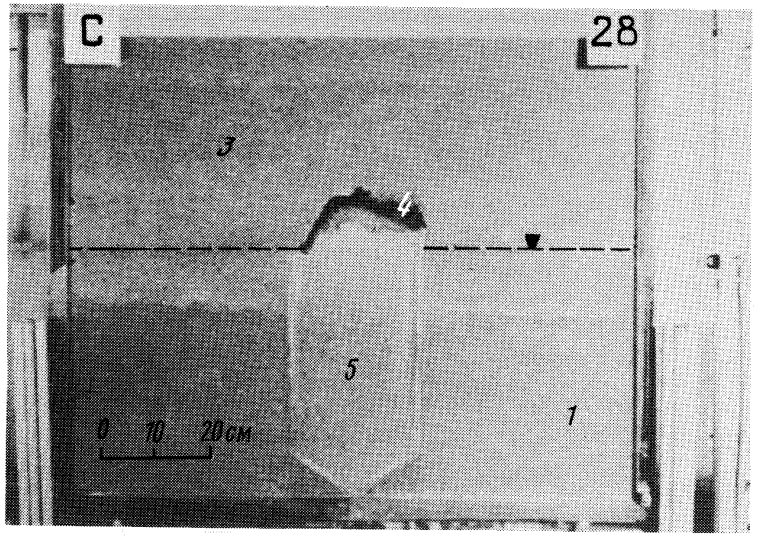


Рис. 13. Полость обрушения, сформировавшаяся над полостью разжижения
Обозначения см. рис. 12

зучего разжижения водонасыщенных песков, протекающим в условиях истечения разжиженной массы через нарушение в водоупоре. Описание этого процесса применительно к иным природным условиям впервые было дано М.Н. Гольдштейном (1953); им же был предложен сам термин "ползучее разжижение". Согласно этому описанию, для возникновения процесса ползучего разжижения необходимо наличие контакта рыхлых песков с лежащими выше более плотными, и тогда, после того как граница разжижения, возникшего по той или иной причине в рыхлых песках, достигнет такого контакта, образуется "ползущая" вверх, заполненная водой "щель", о боковых границах которой ничего не говорится. В условиях рассматриваемых опытов аналогичную роль играет контакт воды и песка в верхней части отверстия в водоупоре. Отличие же от схемы Гольдштейна заключается в том, что выпадающий вниз песок не откладывается в виде слоя, а истекает через отверстие и в связи с этим вверх "ползет" не вся щель, заполненная водой, а верхняя граница этой щели, ограниченной с боков песком, оплывшим под углом естественного откоса в результате потери структурной прочности. Поскольку в условиях ползучего разжижения песок, залегающий выше верхней границы щели, по своим свойствам не отличается от разжиженного (Иванов, 1962), то при гравитационном сдвижении блока над неустойчивой полостью он легко заполняет ее пространство, отфильтровывая сквозь себя вытесняемую им воду (см. рис.13).

Рассматриваемый процесс сам по себе состоит из трех процессов-компонентов: разрушения структуры водонасыщенного песка в результате внешнего силового воздействия, собственно разжижения песка возникающим при этом восходящим фильтрационным потоком и последующего истече-

Таблица 4. Результаты экспериментального изучения фильтрационного разрушения песков в восходящем потоке (ползучего разжижения)

Индекс серии и номер опыта	Полуширина сквозного нарушения в водоупоре a_0, см	Мощность зоны аэрации M_a, см	Мощность зоны насыщения H_1, см	Напор воды в нижней камере за вычетом мощности водоупора H_0, см	Параметры полости разжижения		Параметры формы обрушения		Окончательная форма разрушения
					Максимальная полуширина верхней части a, см	Максимальный угол наклона боковой поверхности α	Высота верхней точки полости над кровлей водоупора b, см	Высота полости или глубина провала l, см	
К 14а	1,2	32	34	34	13	35°	50	9	Полость обрушения
К 14б	1,2	32	34	30	12	35°	52	8	То же
К 15а	1,2	0	66	66	23	36°	–	17	Провал
К 15б	1,2	0	66	64	22	34°	–	15	"
К 16а	1,2	27	7	7	6	34°	11	4	Полость обрушения
К 16б	1,2	27	7	5	7	36°	11	5	То же
К 17а	1,2	0	34	34	13	35°	–	9	Провал
К 17б	1,2	0	34	32	13	35°	–	9	"
К 18а	1,5	59	7	7	7	34°	11	5	Полость обрушения
К 18б	1,5	59	7	3	5	36°	12	4	То же
С 5а	1,5	42	26	26	13	36°	38	9	"
С 5б	1,5	42	26	22	11	35°	34	8	"
С 20	1,2	2,4	11	11	10	34°	18	7	"
С 24	1,2	9	11	11	11	34°	–	7	Провал
М 15а	1,2	32	34	34	21	36°	54	15	Полость обрушения
М 15б	1,2	32	34	30	19	36°	48	14	То же
М 16	1,2	17	17	17	18	36°	–	13	Провал

ния разжиженной грунтовой массы через сквозное нарушение в водоупоре. Тем не менее ползучее разжижение, протекающее в подобных условиях, допустимо рассматривать как единый процесс, поскольку первые два его элемента весьма трудно (а для решения данной задачи и нецелесообразно) отделять друг от друга, а последний элемент, по существу, не является самостоятельным, так как постоянно сопровождает первые два. Это связано с тем, что разрушение структуры водонасыщенного песка может происходить только при возникновении сквозного нарушения такой ширины, которая загодя обеспечивает последующее истечение разжиженного песчаного материала.

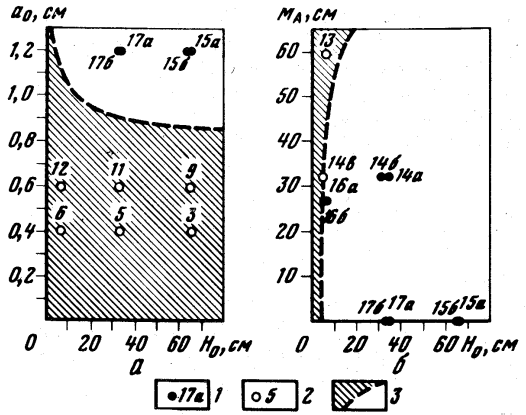


Рис. 14. Условия возникновения в крупных песках процесса ползучего разжижения в зависимости от величины напора воды в нижней камере

а – при различной ширине сквозного нарушения в водоупоре и постоянной (нулевой) мощности зоны аэрации; *б* – при различной мощности зоны аэрации и постоянной ширине сквозного нарушения, равной 2,4 см; *1*, *2* – опыты, в ходе которых наблюдалось развитие ползучего разжижения (*1*) и ползучее разжижение не наблюдалось (*2*); *3* – область, в пределах которой исключается развитие ползучего разжижения, и ее условная граница

Причины, вызывающие развитие наблюдавшегося процесса до конца не ясны и могут объясняться резким изменением напряженного состояния водонасыщенных песков в зоне, непосредственно примыкающей к сквозному нарушению при его внезапном образовании. Экспериментальные данные (табл. 4) свидетельствуют о том, что условия формирования в песках определенного типа неустойчивых треугольных полостей определяются сочетанием, как минимум, трех параметров (рис. 14): напора воды в нижней камере, ширины сквозного нарушения и мощности зоны аэрации.

Формирование в водонасыщенных песках зон фильтрационного разрушения (рис. 15 и 16) происходит в результате воздействия на их структуру нисходящего фильтрационного потока. Процесс протекает только при снижении отметки напора воды в нижней камере ниже уровня в боковых.

Зоны фильтрационного разрушения имеют четкие контуры, а водонасыщенный песок внутри них приобретает более светлую окраску. Контуры разрушения в одних случаях могут замыкаться в пределах зоны насыщения и напоминать своей формой вытянутые эллипсы (см. рис. 15), в других – полностью пронизывать зону насыщения в виде расширяющегося кверху "хобота" (см. рис. 16). В последнем случае во влажных песках зоны аэрации непосредственно над зоной разрушения намечается свод обрушения параболической формы или образуется обвальная полость.

Процесс фильтрационного разрушения проявляется весьма ярко и способен оказывать мощное воздействие на другие процессы, например, на гравитационное обрушение водонасыщенного песка в карстовую полость. Опыты, проведенные сотрудниками Дзержинской карстовой лаборатории ПНИИИСа (Толмачев и др., 1982), показали, что при отсутствии пьезомет-

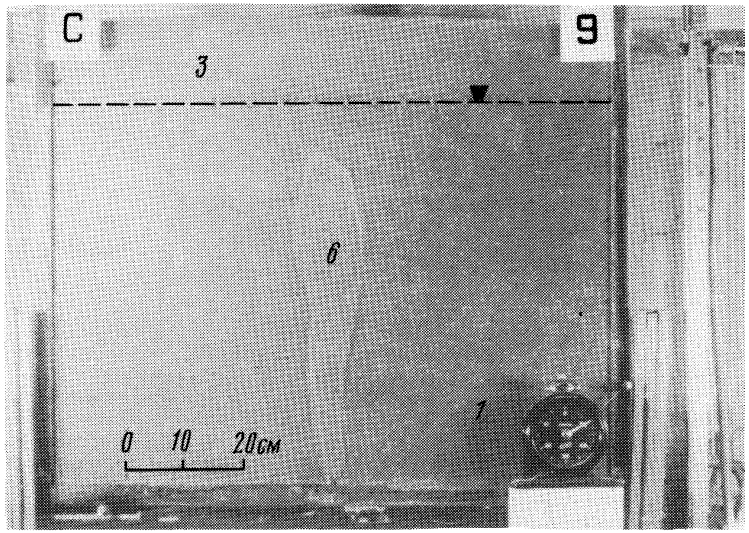


Рис. 15. Зона фильтрационного разрушения, замкнутая в пределах зоны насыщени
Обозначения см. рис. 12

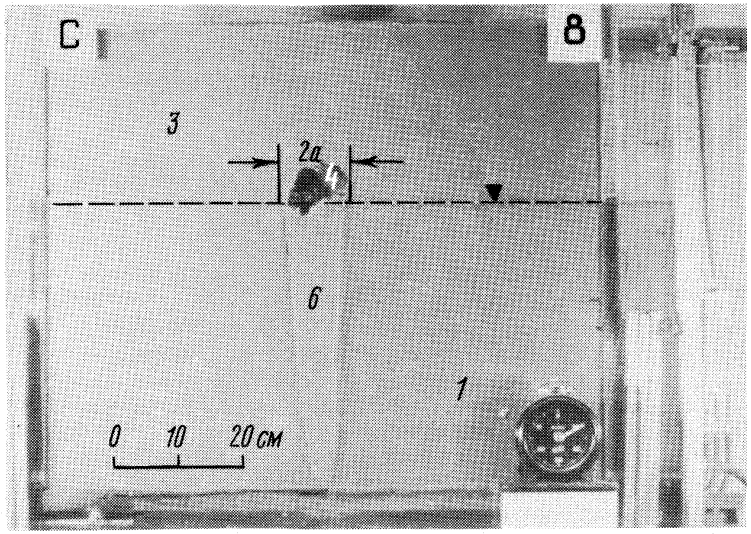


Рис. 16. Полость обрушения, сформировавшаяся над зоной фильтрационного р рушения
Обозначения см. рис. 12

Таблица 5. Результаты экспериментального изучения фильтрационного разрушения песков в нисходящем потоке

Индекс серии и номер опыта	Полуширина сквозного нарушения в водоупоре a, см	Мощность зоны аэрации M_A, см	Мощность зоны насыщения H_1, см	Снижение напора воды в нижней камере в начале разрушения $H_1 - H_0$, см	Параметры форм разрушения			Форма разрушения
					Высота верхней точки полости над кровлей водоупора b, см	Высота полости, глубина провала или воронки l, см	Полуширина зоны фильтрационного разрушения на границе с зоной аэрации a, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
К 1	0,4	59	7	3	12	2	5	Полость обрушения
К2	0,4	32	34	4	39	1	5	То же
К 3	0,4	0	66	3	46	2	–	Суффозионная полость
К 4	0,4	27	7	4	11	3	5	Полость обрушения
К 5	0,4	0	34	3	33	5	–	Суффозионная полость
					–	5	6	Суффозионная воронка
К 6	0,4	0	7	4	–	4	5	То же
К 7	0,6	59	7	5	11	11	4	Полость обрушения
К 8	0,6	32	34	4	29	3	–	Суффозионная полость
					39	12	6	Полость обрушения
					42	21	9	То же
					47	33*	14	”
К 9	0,6	0	66	3	64	11	–	Суффозионная полость
					–	23*	24	Суффозионная воронка
К 10	0,6	27	7	4	10	10	3	Полость обрушения
К 11	0,6	0	34	4	–	21*	16	Суффозионная воронка
К 12	0,6	0	7	5	–	2	2	То же
К 13	1,2	59	7	7	15	15	7	Полость обрушения
К 14в	1,2	32	34	30**	37	3	3	То же
					43	10	9	”
					55	26*	18	”
С 3	0,6	30	38	7	33	2	–	Суффозионная полость
					44	15	7	Полость обрушения
					54	35*	9	То же
С 4	1,5	58	10	–	–	–	–	–
С 6	0,1	38	30	4	5	~0	–	Суффозионная полость
С 7	0,4	45	23	7	28	11	5	Полость обрушения
С 8	0,4	26	42	6	48	8	5	То же
С 9	0,4	12	56	5	49	3	–	Суффозионная полость
С 10	0,4	2	66	5	51	3	–	То же
С 11	0,4	61	7	7	11	11	5	Полость обрушения
С 12	0,6	50	18	9	18	18	–	Суффозионная полость
					24	24	7	Полость обрушения
					28	28	10	То же
С 13	0,6	35	33	7	39	15	6	”
					50	33	10	”
С 14	0,6	16	52	6	55	10	5	”

Таблица 5 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
					–	28*	9	Провал
С 15	0,6	59	9	–	–	–	–	–
С 16	0,9	52	16	–	–	–	–	–
С 17	0,9	41	27	8	15	10	–	Суффозионная полость
					24	12	–	То же
					32	18	5	Полость обрушения
					40	24*	8	То же
С 18	0,9	48	20	11	25	9	5	”
					32	32	8	”
С 19	0,9	61	7	–	–	–	–	–
С 21	1,2	57	11	–	–	–	–	–
С 22	1,2	57	11	–	–	–	–	–
С 23	1,2	57	11	–	–	–	–	–
С 26	0,4	19	49	5	46	4	–	Суффозионная полость
С 27	0,6	48	20	7	26	20	5	Полость обрушения
					32	32	7	То же
М 1	0,1	59	7	–	–	–	–	”
М 2	0,1	32	34	7	9	2	–	Суффозионная полость
М 3	0,1	0	34	8	8	1	–	То же
М 4	0,1	0	7	–	–	–	–	–
М 5	0,4	59	7	–	–	–	–	–
М 6	0,4	49	17	14	6	6	–	Суффозионная полость
М 7	0,4	32	34	10	21	21	–	То же
М 8	0,4	17	17	13	5	5	–	”
М 9	0,4	0	34	10	28	26	–	”
М 10	0,6	49	17	–	–	–	–	–
М 11	0,6	32	34	18	39	18*	12	Полость обрушения
М 12	0,6	17	17	–	–	–	–	–
М 13	0,6	0	34	18	–	20*	14	Суффозионная воронка
М 14	1,2	49	17	–	–	–	–	–
М 17	0,9	32	34	20	42	19*	12	Полость обрушения

* Истечение песка в нижнюю камеру прекратилось в связи с ее переполнением.
** В опыте К 14в напор воды в нижней камере был снижен на 30 см до образования сквозного нарушения в водоупоре.

рического напора в трещинно-карстовых водах обрушение водонасыщен ных песков в лишенную воды полость происходит внутри некоего вытяну того эллиптического контура, тем более отличающегося размерами и фор мой от параболы, чем более мощность зоны насыщения песков превосхо дит ширину полости, т.е. как это будет показано в дальнейшем, чем силь нее проявляет себя гидродинамический фактор. Таким образом, в услови ях, когда покрывающие несвязные породы содержат постоянный водонос ный горизонт, их ”чистое” гравитационное обрушение может происходит только над очень крупной карстовой полостью, имеющей ширину, соизме римую с мощностью зоны насыщения.

Полное фильтрационное разрушение песков возникает тогда, когда си лы гидродинамического давления на их скелет превышают сопротивле

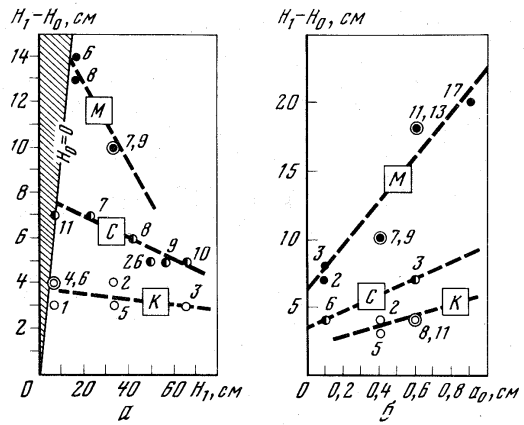


Рис. 17. Зависимость снижения напора воды в нижней камере, вызывающего фильтрационное разрушение песков

а – от мощности зоны насыщения, при постоянной ширине сквозного нарушения в водоупоре, равной 0,8 см; *б* – от ширины сквозного нарушения, при постоянной мощности зоны насыщения, приблизительно равной 34 см

Цифры – номера опытов

ние породы разрыву и сдвигу, после чего происходит разрушение скелетной структуры. Таким образом, в конкретных условиях сам процесс и пространственные границы фильтрационного разрушения определяются наложением друг на друга двух силовых полей: поля напряжений, вызванных собственным весом пород, и поля гидродинамических сил.

Интенсивность гидродинамического воздействия на водопроницаемые покрывающие породы выражается разницей уровней или напоров надкарстовых и трещинно-карстовых вод. Результаты опытов, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что для фильтрационного разрушения песков необходимо гидродинамическое воздействие тем большей интенсивности, чем меньшей крупностью зерен обладает порода и чем меньше мощность зоны насыщения (рис. 17, *а*). Первое обстоятельство, очевидно, связано с более высоким сопротивлением разрыву более мелких песков, а второе – с конфигурацией сетки фильтрации, представляющей собой поле действия гидродинамических сил. На конфигурацию фильтрационной сетки оказывает влияние и ширина отверстия в водоупоре (рис. 17, *б*).

Граница, отделяющая условия, при которых контур области разрушения охватывает всю мощность зоны насыщения, от условий замыкания этого контура в пределах водонасыщенной зоны, также определяется соотношением величин H_1 и $2a_0$ для песков данного типа. Обращает на себя внимание тот факт, что в условиях проведения опытов не было отмечено какого-либо влияния мощности зоны аэрации на величины снижения напора воды в нижней камере, при которых начиналось формирование зон фильтрационного разрушения, и на пространственную конфигурацию этих зон.

Рассматриваемый процесс имеет определенные границы. При больших величинах отверстий в водоупоре и значительных напорах воды в нижней камере он не может протекать, так как сразу же после возникновения

сквозного нарушения начинается процесс ползучего разжижения водонасыщенных песков. Кроме того, величина H_1-H_0 не может быть больше, чем H_1 (при $H_0 = 0$), а этой разницы напоров может не хватить для создания гидродинамического воздействия такой интенсивности, которая позволила бы преодолеть силы внутреннего сопротивления данных песков фильтрационному разрушению.

Водонасыщенные пески, залегающие в массиве, не испытывающем гидродинамических воздействий, способных привести к полной деструкции этих пород, представляют собой среды, обладающие структурной прочностью (Платов, 1982), в частности определенным, хотя и очень малым, сопротивлением разрыву (Черняк, 1976). Это выражается, например, в формировании относительно устойчивых форм гравитационного обрушения водонасыщенных песков над достаточно крупными подземными полостями, принципиально не отличающихся от аналогичных форм, наблюдаемых во влажных песках. Такие явления неоднократно отмечались в ходе лабораторных экспериментов (Толмачев и др., 1982). Совершенно по-иному ведут себя водонасыщенные пески, структура которых подверглась полному фильтрационному разрушению. В этом случае песок приобретает свойства вязкой жидкости, и его перемещение в подземные полости уже приобретает вид не гравитационного обрушения четко оконтуренного блока, а вязкопластического течения грунтовой массы по всей высоте зоны фильтрационного разрушения. Такое течение водонасыщенного песка, в отличие от его гравитационного обрушения, может происходить через отверстия весьма малых диаметров и обусловлено действием не только гравитационных, но также гидродинамических и гидростатических сил.

Истечение песчаной пульпы происходит как бы из бункера, стенки которого сложены песками, сохранившими достаточную структурную прочность. При этом по мере истечения растет свободное пространство в верхней части "бункера", представляющее собой подземную полость. В том случае, когда истечение происходит внутри контура, замкнутого в пределах зоны насыщения, формируются суффозионные полости (рис. 18), хорошо изученные на объемных фильтрационных моделях сотрудниками Пермского университета (Архидьяконских, 1971). В случае же выхода разрушенной зоны на поверхность подземного потока и дополнительного наложения на процесс фильтрационного разрушения водонасыщенных песков процесса гравитационного обрушения влажных песков зоны аэрации происходит формирование суффозионно-обвальных полостей.

Устойчивые полости в полном объеме могут сформироваться лишь при условии полного истечения песка; если же истечение было частичным, то результатом явятся различного рода промежуточные полости, которые будут иметь определенную высоту l, а также некоторое возвышение своей верхней точки над поверхностью подстилающего водоупора b. Окончательные размеры суффозионных и суффозионно-обвальных полостей, сформировавшихся в ходе опытов (см. табл. 5), свидетельствуют о том, что процесс вязкопластического истечения протекает тем легче, чем шире нарушение в водоупоре, чем меньше крупность зерен песка и чем меньше высота верхней точки полости (рис. 19). Результаты опытов показывают, что даже при наличии неограниченной области выноса отметка нижней точки по-

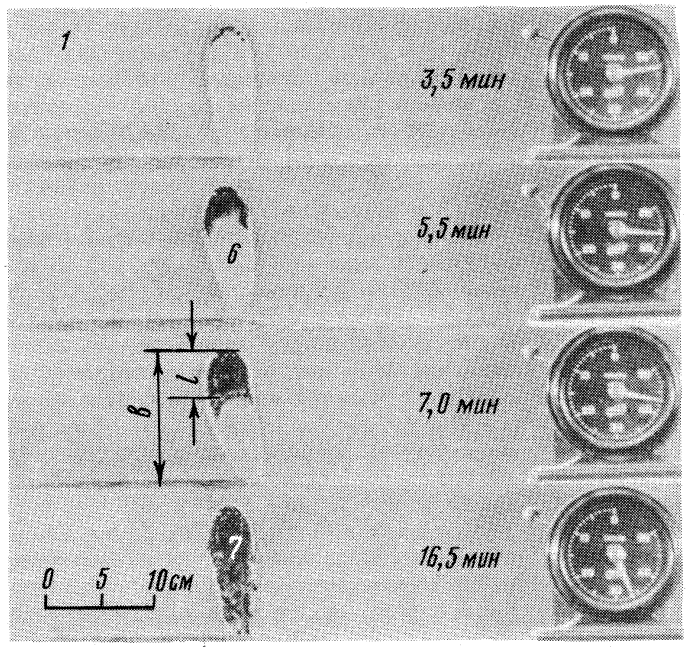


Рис. 18. Фотограмма роста суффозионной полости
Обозначения см. рис. 12

лости не может занять более низкое положение, чем отметка напора воды в нижней камере. При $H_0 \leqslant 0$ может произойти полное истечение грунтовой массы.

Таким образом, многообразие форм разрушения песчаных пород, наблюдавшееся в ходе моделирования на фильтрационной установке, обусловлено действием четырех процессов, часто протекающих совместно или последовательно: ползучего разжижения, фильтрационного разрушения в нисходящем потоке, вязкопластического течения и гравитационного обрушения. Последний процесс неотступно сопровождает первые три и завершает определенные фазы их развития в виде обрушения водонасыщенных песков над полостью разжижения (см. рис. 13) или песков зоны аэрации над зоной

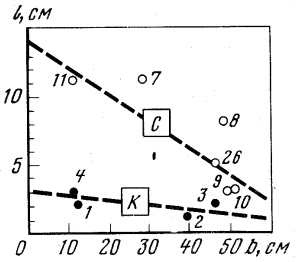


Рис. 19. Зависимость высоты полостей, формирующихся в песках в результате их фильтрационного разрушения нисходящим потоком, от высоты их верхних точек над кровлей водоупора при постоянной ширине сквозного нарушения, равной 0,8 см, в условиях снижения напора воды в нижней камере ниже кровли водоупора
Цифры – номера опытов

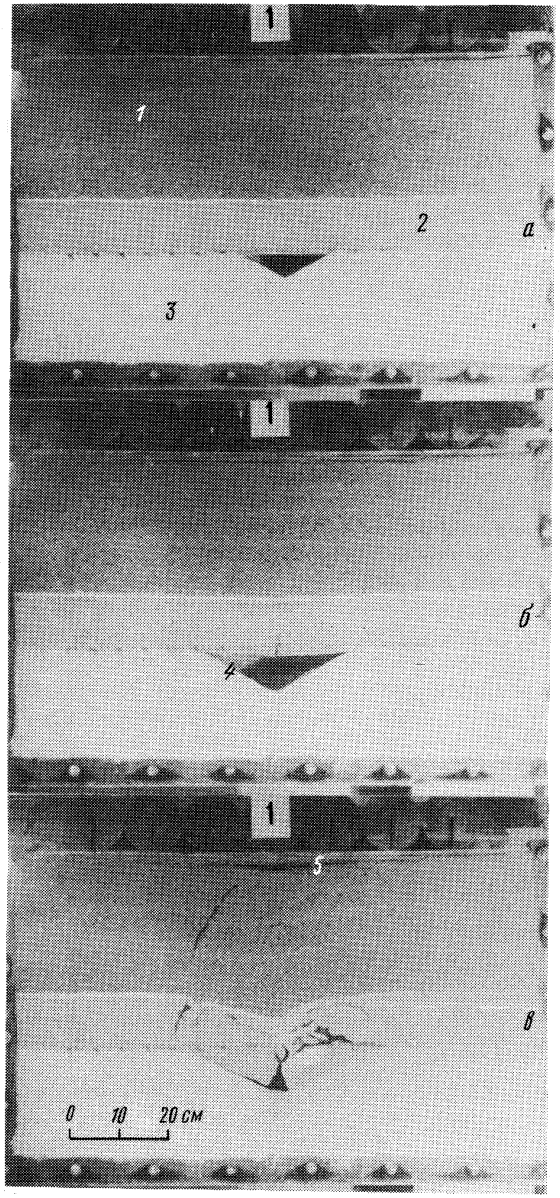


Рис. 20. Последовательное обрушение промежуточного водоупора
а – прогиб; *б* – появление трещин; *в* – полное разрушение; *1* – пригрузка (влажный песок); *2* – эквивалентный материал; *3* – сухой песок; *4* – воронкообразная полость; *5* – провал

Таблица 6. Результаты экспериментального изучения обрушения промежуточных водоупоров

Номера опыта	Линейный масштаб моделирования	Параметры натуры			Характер обрушения песков пригрузки
		Плотность песчаных пород, перекрывающих водоупор $\rho_п$, 10^3 кг/м^3	Полуплощадь лицевой поверхности песка внутри контура обрушения S, м^2	Полуширина полости, вызывающей обрушение водоупора $a_р$, м	
П*	1 : 1	0,49	0,0023	0,05	Внутренний вывал
1	1 : 1	0,64	0,0279	0,16	Провал
2	1 : 2,82	0,56	0,1033	0,25	Внутренний вывал
3	1 : 2,27	0,50	0,0767	0,23	То же
4	1 : 3,35	0,58	0,0493	0,20	"
5	1 : 4,71	0,46	0,3024	0,42	"
6	1 : 2,04	0,60	0,0847	0,31	"
7	1 : 1,47	0,64	0,0437	0,21	Провал
8	1 : 6,39	0,60	0,1140	0,38	Внутренний вывал
9	1 : 3,67	0,55	0,1122	0,33	То же
10	1 : 4.33	0,51	0,0520	0,26	"
11	1 : 1.32	0,61	0,0666	0,36	Провал
12	1 : 2,27	0,65	0,2171	0,52	"
13	1 : 3.73	0,66	0,1751	0,37	Внутренний вывал
14	1 : 4.48	0,52	0,1200	0,40	То же
15	1 : 9.47	0,64	0,2508	0,57	"
16	1 : 3,20	0,99	0,3862	0,86	Провал
17	1 : 2,89	0,74	0,4075	1,10	"
18	1 : 4,91	0,57	0,8719	1,03	"
19	1 : 7,71	0,69	1,1909	1,16	Внутренний вывал
20	1 : 28,4	0,42	9,8821	2,27	То же
21	1 : 8,47	0,59	2,3183	1,69	Провал
22	1 : 6,07	0,76	1,3277	1,64	"
23	1 : 7,43	0,81	2,1921	1,93	"
24	1 : 11,3	0,54	2,1383	1,58	Внутренний вывал
25	1 : 40,6	0,62	8,4632	2,84	То же

*Осредненный результат серии опытов по изучению гравитационного обрушения влажных песков пригрузки (нулевая мощность промежуточного водоупора).

фильтрационного разрушения (см. рис. 16). Любопытно отметить, что, согласно проделанным опытам, повышение пьезометрического напора трещинно-карстовых вод представляет не меньшую опасность с точки зрения развития карстово-суффозионных процессов, чем его снижение. Снижение отметки напора трещинно-карстовых вод ниже кровли лежащего выше водоупорного слоя в наибольшей степени благоприятствует развитию фильтрационного разрушения и вязкопластического течения, но полностью исключает ползучее разжижение.

Моделирование гравитационного обрушения промежуточных водоупоров еще раз позволило убедиться в справедливости представлений В.Д.Слесарева о четырех предельных пролетах (Альбов, 1948). В общем виде развитие деформаций на модели происходило так, как это показано на рис. 20. Вначале, при расширении воронкообразной полости, никаких подвижек не отмечалось ни визуально, ни с помощью индикатора, и это продолжалось вплоть до достижения воронкой определенного размера. Затем индикатор начинал фиксировать развитие деформаций, но визуально они почти не наблюдались (рис. 20, *а*) до тех пор, пока не достигалась новая критическая ширина воронки, превышение которой вызывало развитие в глинистом слое видимых трещин (рис. 20, *б*). Процесс завершался в тот момент, когда воронка достигала величины, обеспечивающей обрушение водоупорного слоя (рис. 20, *в*). При этом в лежащих выше песках фиксировалась полость обрушения или формировался провал.

Результаты опытов наглядно демонстрируют, что процессы обрушения глинистого слоя и лежащих выше песков представляют собой единое целое. В этой связи следует отметить, что от опыта к опыту фактически происходило неконтролируемое изменение еще одного параметра – естественной плотности песка, перекрывающего промежуточный водоупор $(\rho_п)_N$, и, следовательно, его удельного веса $(\gamma_п)_N$, хотя соответствующее свойство модельного материала $(\gamma_п)_M$ оставалось неизменным. Этот эффект связан с существованием критерия подобия, представленного формулой (3).

Изменение рассматриваемого параметра (с учетом трения песка об оргстекло) вместе с основными результатами опытов представлены в табл. 6. К сожалению, одной из особенностей факторных планов (в отличие от классических) является то, что результаты экспериментов, спланированных по этой схеме, до их специальной обработки не обладают наглядностью и не демонстрируют никаких тенденций и закономерностей. Обработка же этих данных фактически представляет собой построение детерминированной математической модели.

МЕХАНИЗМ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОГО ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

ФОРМИРОВАНИЕ СКВОЗНЫХ НАРУШЕНИЙ В ПОДСТИЛАЮЩЕМ ВОДОУПОРЕ

В случае, когда постоянный водоносный горизонт, присутствующий в несвязных покрывающих породах, отделен от горизонта трещинно-карстовых вод подстилающим водоупором, важнейшим условием, необходимым для развития карстово-суффозионных процессов, становится наличие в нем сквозных нарушений сплошности в виде трещин, промоин, зон обрушения и т.п., через которые осуществляется гидравлическая связь между водоносными горизонтами и происходит суффозионный вынос разрушенных покрывающих пород в карстовые трещины и полости. Опыты, проделанные на лабораторных физических моделях, предусматривали наличие или возникновение таких нарушений, однако имитация их образования при условии совпадения отметок уровня воды в боковых камерах и напора

в нижней может интерпретироваться двояко. С одной стороны, возникновение щели в водоупорной системе в условиях гидродинамического равновесия можно рассматривать как модель выхода трещины или полости в карстующихся породах на контакт с покрывающими, при наличии в них единого водоносного горизонта (условия типа Б1, представленные на рис. 6). С другой стороны, водоупорная система может восприниматься как подстилающий водоупор, и тогда фильтрационная модель имитирует условия типа Г (см. рис. 6). Для таких условий большую важность приобретает вопрос о характере образования и возможностях роста сквозных нарушений в подстилающем водоупоре.

С точки зрения влияния условий образования сквозных нарушений на механизм суффозионного разрушения лежащих выше водонасыщенных пород следует рассматривать две принципиально различные ситуации: поперечные размеры нарушения увеличиваются во времени и они практически остаются неизменными. Первая ситуация связана с образованием и ростом трещин разрыва в процессе прогиба водоупорного слоя или с образованием в нем сквозного канала сосредоточенной фильтрации за счет растворения солевых включений, с его последующим расширением в результате суффозионного размыва. Прогиб подстилающего водоупора в лежащую ниже карстовую полость способен развиваться не только вследствие ее роста за счет растворения карстующихся пород, но и при неизменных размерах полости. Как правило, это связано с суффозионным разрушением и выносом заполнителя, а также с увеличением давления на кровлю водоупора или со снижением гидростатического противодавления на его подошву. Первоначальные трещины разрыва могут впоследствии расширяться не за счет действия растягивающих напряжений, а в результате суффозионного размыва нисходящим потоком. Вторая ситуация характеризуется наличием "готовых" древних форм подземного обрушения, захватывающих покрывающую толщу, в том числе и подстилающий водоупор. Если при этом карстующиеся породы характеризуются слабой растворимостью, а породы, слагающие водоупор, устойчивы к суффозионному разрушению, поперечные размеры сквозных нарушений практически не увеличиваются.

Ситуация, в которой отмечается увеличение размеров сквозных нарушений сплошности подстилающего водоупора, имеет две разновидности: сквозные нарушения могут либо постепенно расти от нуля, либо "внезапно" возникать, имея при этом определенный поперечный размер. Явление внезапного возникновения сквозных нарушений в водоупоре объясняется фактической дискретностью протекания всех процессов, связанных с постепенным разрушением горных пород, как весьма специфических сред, однако в ряде случаев (например, при растворении карстующихся пород) эта дискретность столь высокочастотна, что маскируется под непрерывность. Внезапное возникновение сквозных нарушений в подстилающем водоупоре может быть вызвано и техногенными причинами, например, производством буровых работ.

"Готовые" нарушения сплошности подстилающего водоупора, как правило, не бывают связаны с современным активным карстом, а представляют собой различного рода палеокарстовые явления. Иногда они представляют собой результат развития других геологических процессов (выветривания, поверхностной эрозии, тектонических подвижек и др.).

ФОРМИРОВАНИЕ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОВАЛОВ

Провалообразование, связанное с развитием в водонасыщенных несвязных породах фильтрационного разрушения в восходящем потоке (ползучего разжижения), может иметь место только в том случае, когда отметка пьезометрического напора трещинно-карстовых вод значительно превышает отметку кровли подстилающего водоупора. Рассматриваемый вид карстово-суффозионных разрушений возникает в результате внезапного образования сквозного нарушения в подстилающем водоупоре или внезапного выхода карстовой трещины или полости на контакт с несвязными покрывающими породами при наличии единого водоносного горизонта в карстующихся и покрывающих породах. Если такого рода нарушения уже имеются, ползучее разжижение, приводящее к провалообразованию, возникает вследствие появления восходящего фильтрационного потока. Причиной его появления может явиться поступление воды из карстовых полостей и трещин в лежащие выше водонасыщенные несвязные породы (например, в условиях восстановления сработанных уровней трещинно-карстовых вод) или отток воды из покрывающих пород, равно как и поступление ее в карстующиеся, при наличии постоянного горизонта надкарстовых вод независимо от того, присутствует или отсутствует подстилающий водоупор.

Провалообразование, вызванное ползучим разжижением водонасыщенных песков, протекает следующим образом (рис. 21, *а*). Вначале над сквозным нарушением в подстилающем водоупоре или над контактом с карстовой трещиной или полостью возникает заполненная водой полость разжижения. Она увеличивается в размерах до тех пор, пока над ней не произойдет обрушение лежащих выше пород. В результате этого в песках образуется сводообразная полость обрушения, которая быстро заполняется поступающей вверх водой. Эта полость постепенно разрушается, а на ее месте формируется новая, более широкая полость разжижения, которая разрушается, так же как и первая, вследствие обрушения песков внутри параболического свода уже значительно бóльших размеров. Таким образом, происходит последовательное скачкообразное "продвижение" вверх сменяющих друг друга полостей разжижения и обрушения все более крупных размеров в плане, пока очередная полость разжижения не достигнет в своей верхней части пролета, достаточного для выхода обрушения на поверхность в виде провала. При этом уровень подземных вод над полостью повышается за счет восходящей фильтрации, возникающей при отжатии воды из полости вследствие ее заполнения материалом обрушения. Очевидно, этим можно объяснить довольно часто наблюдаемое появление на дне свежих провалов воды, уровень которой расположен выше уровня грунтовых вод.

Здесь дополнительно возникают два вопроса: каким образом на обрушение покрывающих пород может повлиять наличие среди них промежуточных водоупоров и не исключает ли такое наличие формирования провалов и какова должна быть глубина провала? Эти вопросы очень тесно взаимосвязаны, поскольку степень разрушения промежуточных водоупоров определяется не только шириной ослабленного пространства в их основании, но и величиной стрелы прогиба, которая определяется высотой полости разжижения. В настоящее время дать однозначные ответы на эти вопрос

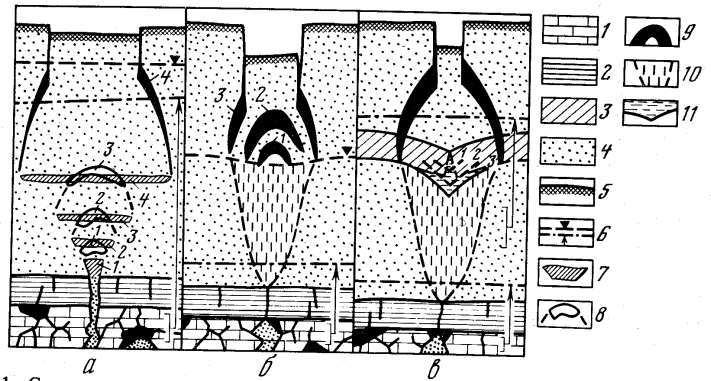


Рис. 21. Схемы, иллюстрирующие механизм карстово-суффозионного провалообразования, возникающего в результате фильтрационного разрушения песчаных пород
а – в восходящем потоке; *б* – в нисходящем потоке при отсутствии промежуточных водоупоров; *в* – в нисходящем потоке при наличии промежуточного водоупора; *1* – карстующиеся породы; *2* – подстилающий водоупор; *3* – промежуточный водоупор; *4* – песчаные породы; *5* – поверхность земли; *6* – уровни и напоры подземных вод; *7* – полость разжижения; *8* – полость обрушения в водонасыщенных песках; *9* – полость обрушения в песках зоны аэрации; *10* – зона фильтрационного разрушения; *11* – суффозионная воронка

затруднительно, что объективно связано со сложностью общей картины протекания процесса ползучего разжижения. Сложность эта состоит в том, что высота продвигающейся вверх заполненной водой "щели" при ее фиксированной ширине изменяется от скачка к скачку в зависимости от изменения плотности водонасыщенного песка по разрезу (Иванов, 1962): при увеличении плотности снизу вверх высота "щели" постоянно уменьшается и процесс может вообще затухнуть, так сказать, на полпути; в противоположном случае она возрастает. Для природных песчаных массивов чаще всего характерна вторая ситуация. Однако следует помнить, что в отличие от классической "щели" полость разжижения, в силу специфики рассматриваемой разновидности этого процесса, имеет тенденцию к постоянному уменьшению высоты, что связано с расширением ее боковых границ.

Для однозначной оценки высоты завершающей полости разжижения, определяющей глубину провала, необходимо также иметь численные значения ряда трудноопределимых параметров водонасыщенных песков. При этом должны быть охарактеризованы все разновидности песков, слагающих массив покрывающих пород. Можно лишь предполагать, что высота конечной полости разжижения соизмерима с высотой начальной полости, которая определяется углом естественного откоса водонасыщенного песка и предельной шириной ее верхней части, обеспечивающей первоначальное обрушение. Для песчаных пород эти величины должны измеряться десятками сантиметров или первыми метрами. Если же внезапное образование сквозного нарушения сплошности подстилающего водоупора связано с обрушением кровли полости в карстующихся породах, высота первоначальной полости разжижения будет определяться высотой полости обрушения.

Фильтрационное разрушение несвязных водонасыщенных покрывающих пород в нисходящем потоке (рис. 21, *б, в*) может возникнуть только в условиях более низкого положения отметки пьезометрического напора трещинно-карстовых вод по отношению к отметке уровня или напора вод надкарстовых. При этом карстово-суффозионные процессы могут иметь место как при наличии "готового" сквозного нарушения сплошности подстилающего водоупора или давно существующего контакта водонасыщенных покрывающих пород с карстовой полостью или трещиной, так и при внезапном возникновении этих форм.

В первом случае вначале может не существовать необходимой разницы отметок уровня (или напора) надкарстовых вод и напора трещинно-карстовых вод, например, при наличии единого водоносного горизонта в карстующихся и покрывающих породах. Тогда рассматриваемый вид карстово-суффозионных разрушений начнет развиваться только при снижении напора трещинно-карстовых вод (например, вследствие их откачки) или при подъеме уровня (напора) надкарстовых вод. В условиях существования единого водоносного горизонта в покрывающих и карстующихся породах, обладающих различной водопроницаемостью, аналогичные процессы возникают соответственно при оттоке воды из карстующихся пород или при ее поступлении в покрывающие.

Во втором случае разрушение несвязных покрывающих пород нисходящим фильтрационным потоком может возникнуть только если в данных условиях полностью исключается развитие процесса ползучего разжижения, т.е. при достаточно малой ширине внезапно возникающего сквозного нарушения в подстилающем водоупоре и при достаточно слабом напоре трещинно-карстовых вод. При наличии единого водоносного горизонта в карстующихся и покрывающих породах это условие обеспечивается только малой шириной верхней части трещины или полости, внезапно выходящей на контакт с несвязными покрывающими породами.

Карстово-суффозионные провалы, возникающие в результате фильтрационного разрушения водонасыщенных покрывающих пород нисходящим потоком, формируются по мере роста разрушающего фактора – разницы напоров надкарстовых и трещинно-карстовых вод. Отсюда следует, что данному виду карстово-суффозионного провалообразования не присущ спонтанность, весьма характерная для процесса ползучего разжижения.

В ходе последовательного снижения пьезометрического напора трещинно-карстовых вод или повышения уровня (напора) надкарстовых вод, которые, как правило, бывают вызваны искусственными причинами, наступает момент, когда достигаются условия, достаточные для возникновения в водонасыщенных покрывающих породах процесса их фильтрационного разрушения в нисходящем потоке в сочетании с вязкопластическим истечением разрушенной грунтовой массы в карстовые трещины и полости. При дальнейшем нарастании разрушающего воздействия первоначальная небольшая зона фильтрационного разрушения, контур которой замкнут в пределах зоны насыщения, постепенно увеличивается в размерах. В определенный момент она выходит на поверхность зоны насыщения и, расширяясь, вызывает подземное гравитационное обрушение пород зоны аэрации. В результате этого во влажных песках начинается последовательное формирование все более крупных полостей обрушения, которое продолжается до тех пор, пока не произойдет выход подземного обруш

ния на дневную поверхность в виде провала (см. рис. 21, *б*). При напорном характере надкарстовых вод рост зоны фильтрационного разрушения, сопровождаемый вязкопластическим истечением разрушенного песка, вызывает постепенное расширение воронкообразной суффозионной полости в основании промежуточного водоупора, в конечном счете приводящее к его разрушению. В песчаных породах, перекрывающих водоупор, при этом "внезапно" возникает гравитационное обрушение, способное при определенных условиях выйти на поверхность (см. рис. 21, *в*).

Предлагаемые схемы механизма образования карстово-суффозионных провалов при наличии в покрывающих породах постоянных водоносных горизонтов вполне объясняют наблюдавшиеся в натуре ситуации, когда провалообразованию предшествовало появление оседаний и неглубоких провалов большего диаметра. В первом случае можно предположить, что подобным образом за счет прогиба проявлялись на поверхности подземные полости обрушения пород зоны аэрации, во втором – что процесс ползучего разжижения после его стабилизации сменился при необходимых условиях процессом фильтрационного разрушения в нисходящем потоке, приуроченным к появившемуся сквозному нарушению в подстилающем водоупоре.

Находят объяснения также и факты последующего увеличения глубины и диаметра полностью сформировавшихся карстово-суффозионных провалов, что часто выражается в виде "оживления" засыпанных провальных воронок. Согласно представленным схемам, углубление провалов и провальных воронок карстово-суффозионного происхождения связано с дальнейшим расширением сквозных нарушений сплошности подстилающего водоупора или верхней части карстовой полости, контактирующей с покрывающими породами, с суффозионным разрушением и выносом заполнителя карстовых полостей и трещин, а также со снижением пьезометрического напора трещинно-карстовых вод. Увеличение же диаметра этих форм может происходить в результате продолжающегося снижения напора трещинно-карстовых вод или повышения уровня (напора) вод надкарстовых.

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Существует принципиальная возможность построения количественных инженерно-геологических прогнозов непосредственно на основе результатов физического моделирования, хотя даже в этом случае трудно избежать определенных математических расчетов элементарного характера. Однако таким путем можно построить лишь локальный прогноз, и только в том случае, если мы имеем дело со строго критериальным физическим моделированием. При этом основные ошибки и погрешности, связанные с технологией эксперимента и с принципиальным отличием условий работы модели от природных условий, должны устраняться либо с помощью технических приемов, сводящих эти ошибки к минимуму так, чтобы ими можно было пренебречь, либо путем ввода расчетных поправок. В

инженерном карстоведении подобным образом прогнозируют возможное провалообразование над конкретными карстовыми полостями, основываясь на применении моделей из эквивалентных материалов (Давыдько, 1975; Мартин, Травкин, 1979).

Если же возникает необходимость количественного учета изменчивости определенных параметров геологической среды, например, с целью построения региональных прогнозов, прямой переход от физической модели к прогнозу исключается, и в качестве посредника при таком переходе должна выступать детерминированная математическая модель (Бондарик, 1972), представленная в аналитической или в графической форме (Розовский, Зелинский, 1975). Тенденция перехода от лабораторных физических моделей к детерминированным математическим четко прослеживается в интерпретации комплексных экспериментальных исследований, которые проводятся начиная с 1972 г. в Дзержинской карстовой лаборатории ПНИИИСа при изучении закономерностей карстового провалообразования (Толмачев и др., 1982), однако это пока еще не привело к региональному прогнозированию.

Путь перехода от физического моделирования к региональным прогнозам через детерминированные математические модели, так же как и в первом случае, требует наличия четких критериев подобия и учета или устранения несоответствия модельных условий натурным. Кроме того, экспериментатор должен быть уверен в том, что процессы, протекающие на модели, качественно не отличаются от природных процессов, которые они воспроизводят (Девдариани, 1960). К сожалению, такие благоприятные обстоятельства складываются далеко не всегда, особенно при изучении сложных многокомпонентных процессов, практически недоступных для прямых натурных наблюдений.

Тем не менее подобная ситуация отнюдь не исключает регионального прогнозирования на основе совместного применения лабораторных физических и детерминированных математических моделей. При этом общая схема построения прогнозов выглядит следующим образом: проводится серия лабораторных экспериментов; на базе наблюдаемой качественной картины протекания изучаемых процессов делаются теоретические построения, основанные на определенной гипотезе механизма этих процессов и (если таковые имеются) на существующих аналитических решениях, пригодных для описания их отдельных проявлений; на основе теоретического решения строятся детерминированные математические модели процессов применительно к натурным условиям.

Естественно, что детерминированные математические модели, построенные на основе эмпирических данных (эмпирические модели), в определенном смысле отличаются от моделей, полученных на основе теоретических построений (теоретических моделей). Это отличие может проявляться и во внешней форме: в первом случае детерминированные модели, выраженные аналитически, могут содержать определенные эмпирические коэффициенты, которым не всегда удается подыскать конкретный физический смысл. Подобное обстоятельство, несомненно, является отрицательной чертой таких моделей, тем не менее в целом ряде случаев их применение неизбежно, по крайней мере на самых ранних этапах прогнозирования.

Что касается карстово-суффозионных разрушений, то для их описания

могут применяться детерминированные математические модели обоих типов, однако там, где это возможно, предпочтение должно отдаваться теоретическим моделям, поскольку эмпирические модели могут содержать систематические ошибки, связанные с особенностями методики лоткового моделирования. К ним относятся: практически неустранимые эффекты, вызванные действием капиллярных сил и присутствием защемленного воздуха (Жернов, Павловец, 1976), зависимость устойчивости песка к разжижению от способа его укладки (Ladd, 1977), эффекты "старения", связанные с постепенным изменением фильтрационных и прочностных характеристик модельного материала от опыта к опыту за счет свободного выноса мелких частиц из пор, эффекты "заедания", связанные с засорением шлангов и штуцеров и т.п. Один из видов борьбы с подобными нежелательными явлениями лежит на пути нейтрализации их последствий с помощью применения рандомизированных планов экспериментальных работ (Шенк, 1972). Однако в рассматриваемом случае использование этого приема исключается, поскольку речь идет о типичных невоспроизводимых экспериментах.

МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНОГО ОБРУШЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД

Подземное гравитационное обрушение происходит в том случае, когда в основании горной породы возникает пространство, не способное служить ей опорой, и она не может больше оставаться в "подвешенном" состоянии за счет сил сцепления. Такое ослабленное пространство может либо расти постепенно, либо проявиться внезапно и иметь при этом как бы заранее заданную ширину. В ходе развития карстово-суффозионных процессов первая ситуация имеет место при постепенном расширении первичных полостей разжижения и зон фильтрационного разрушения, а вторая — при разрушении глинистых слоев, подстилающих песчаные породы, и в результате быстрого формирования вторичных полостей разжижения.

Накопленный в настоящее время опыт экспериментального изучения процессов гравитационного обрушения песков во внезапно возникающие подземные полости свидетельствует о том, что при данной мощности перекрывающего песчаного слоя общая картина деформаций зависит от ширины ослабленного пространства (рис. 22). При достаточно малой ширине наблюдается образование подземных полостей обрушения, оконтуренных параболическими сводами (см. рис. 22, *а*), при большей ширине обрушение достигает поверхности и сопровождается формированием провалов (рис. 22, *б, в, г*). Провалообразование может происходить двумя путями. При малой ширине внезапно возникающего ослабленного пространства наблюдается блоковое сдвижение монолитного грунтового "столба" над полостью обрушения (см. рис. 22, *в*), которое в предельном случае принимает вид сдвижения грунтового столба по всей мощности перекрывающего слоя (см. рис. 22, *б*). Это вызывает образование на поверхности земли цилиндрических провалов. В случае же возникновения более крупных ослабленных зон высота свода обрушения начинает превышать мощность перекрывающего слоя (рис. 22, *г*), что приводит к формированию сводообразных провалов (см. рис. 5).

В настоящее время в горной геомеханике выведен ряд расчетных фор-

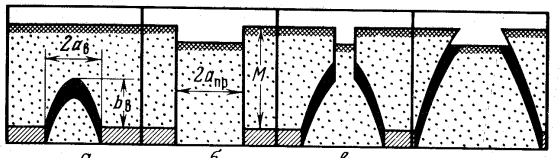


Рис. 22. Виды единовременного обрушения песчаных пород над внезапно возникающим ослабленным пространством

а — образование полости обрушения; *б* — сдвижение монолитного грунтового столба непосредственно над ослабленным пространством; *в* — сдвижение монолитного грунтового столба над полостью обрушения; *г* — непосредственный выход полости обрушения на поверхность

мул, служащих для описания некоторых проявлений гравитационного обрушения пород над горными выработками (Насонов, 1969), которые в какой-то мере могут рассматриваться как аналоги "внезапно" возникающих карстовых полостей. В основе этих математических построений лежат различные гипотезы горного давления, имеющие разную степень сложности, в результате чего разную степень сложности имеют и сами формулы. Учитывая тот факт, что в настоящей работе делаются только первые шаги в создании математических моделей карстово-суффозионных процессов, при их построении представляется целесообразным использование наиболее простых аналитических решений.

Условия формирования внутренних вывалов горных пород (см. рис. 22, *а*) находят весьма простое описание в предложенной М.М. Протодьяконовым теории, которая до сих пор считается в практике горного дела одной из наиболее удачных (Насонов, 1969). Согласно этой теории подземное обрушение, не сопровождающееся выходом на земную поверхность, происходит внутри свода равновесия, имеющего параболическое очертание. Высота такого свода $b_в$ определяется формулой

$$b_в = a_в / f_{кр}, \tag{4}$$

где a — полуширина основания свода обрушения; $f_{кр}$ — коэффициент крепости.

Величина коэффициента крепости отражает, таким образом, крутизну свода. Она зависит от прочностных характеристик породы и ее напряженного состояния и определяется, исходя из выражения

$$f_{кр} = \operatorname{tg}\varphi + C/\sigma_z, \tag{5}$$

где σ_z — нормальное вертикальное напряжение в породе на уровне кровли подземной полости.

Для песчаных пород, имеющих малые величины удельного сцепления, учитывая масштабы протекания процессов гравитационного обрушения в натурных условиях, в расчетах можно пренебречь вторым членом правой части формулы (5), и тогда коэффициент крепости практически становится равным коэффициенту внутреннего трения. В известных пределах такое допущение правомерно и для модельных условий (Давыдько, Толмачев 1977а).

Внутренний вывал формируется над подземной полостью не в любом

случае, а только тогда, когда она имеет такую ширину, что объем породы, заключенный внутри параболического свода равновесия, не может более удерживаться за счет сцепления и отрывается по линии этого свода. Вопрос о том, до какого предела может расширяться ослабленное пространство в основании песчаных пород без образования внутренних вывалов, имеет определенное значение с точки зрения изучения механизма карстово-суффозионных процессов, но не представляет практического интереса для горного дела. В связи с этим в настоящее время отсутствует готовое аналитическое решение такой задачи. Тем не менее в одной из своих ранних работ М.М. Протодьяконов (1912) указал путь такого решения. Практика "плоского" моделирования процессов подземного гравитационного обрушения свидетельствует о том, что в песчаных породах величина такого критического пролета незначительна и может измеряться всего лишь первыми десятками сантиметров. Для того чтобы свод обрушения над полостью подобной ширины смог выйти на земную поверхность, необходимо наличие массива соизмеримой мощности. Таким образом можно считать, что в природных условиях первичные своды обрушения в песках не могут проявиться на поверхности.

Рассмотрим теперь случай, когда над подземной полостью происходит сдвижение монолитного столба по всей мощности перекрывающего слоя (см. рис. 22, *б*). Наиболее простое математическое описание этого явления было дано в начале нашего века немецким исследователем Бирбаумером (Насонов, 1969). Теоретические построения Бирбаумера были основаны на том, что для смещения монолитного столба под действием собственного веса ему необходимо преодолеть сопротивление сдвигу по боковой поверхности в условиях возрастающего с глубиной бокового давления, распределенного по закону треугольника. В этом случае для условий плоской задачи[1] полуширина подземной полости, обеспечивающая провалообразование, определяется параметрами перекрывающего слоя и слагающих его пород и связана с ними выражением

$$a_{\text{пр}} = \frac{M}{2}\,[\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\operatorname{tg}\varphi] + \frac{C}{\gamma}, \qquad (6)$$

где M – общая мощность пород, перекрывающих подземную полость.

Так же как и в формуле (5) и по тем же причинам, применительно к песчаным породам натуры в расчетах можно пренебречь последним членом равенства при рассмотрении граничных условий вертикального сдвижения монолитного грунтового столба. В связи с тем, что для песчаных пород произведение коэффициентов бокового давления и внутреннего трения является величиной, изменяющейся в очень узких

[1] Несмотря на то что условия объемной (осесимметричной) задачи в большей мере соответствуют природным условиям, в настоящей работе все теоретические решения будут представлены в виде решений плоских задач. Это связано с необходимостью стыковки теоретических детерминированных моделей с эмпирическими, построенными по экспериментальным данным, полученным на "плоских" лабораторных установках.

пределах (от 0,18 до 0,19), ее можно принять за постоянную, и тогда формула (6) примет вид

$$a_{\text{пр}} = 0{,}09\,M + \frac{C}{\gamma} = a_{\min}. \qquad (7)$$

Однако условия сдвижения монолитного грунтового столба непосредственно в подземную полость представляют собой граничные условия, а само такое сдвижение является лишь частным, предельным случаем сдвижения грунтового столба над сводом обрушения, когда ширина основания свода совпадает с шириной столба. Поэтому оно очень редко встречается в чистом виде, что, по-видимому, и является причиной скептического отношения некоторых авторов к построениям Бирбаумера. Если полуширина подземной полости превышает величину, определяемую формулой (6), то грунтовый столб сдвигается уже над полостью обрушения и имеет меньшую ширину (рис. 22, *в*). Соответственно меньший диаметр имеет и провал, образующийся на поверхности грунтового массива.

Формирование цилиндрических провалов, связанное со сдвижением монолитного столба, происходит только тогда, когда высота свода обрушения меньше или равна мощности перекрывающего слоя. Если же она превышает эту мощность, на поверхности образуется сводообразный провал (рис. 22, *г*), диаметр которого определяется уже, исходя из уравнения, описывающего контур свода обрушения.

При экстремальном прогнозировании развития процессов провалообразования, вызванных подземным гравитационным обрушением горных пород над внезапно возникающим ослабленным пространством, наибольший интерес представляет выявление условий, в которых это обрушение не может достигать земной поверхности. Такие условия будут существовать до тех пор, пока полуширина ослабленного пространства не превышает величину, определяемую формулой (7). В свою очередь, при рассмотрении условий провалообразования следует исходить из наименее благоприятной обстановки и в связи с этим считать, что не исключена возможность образования провала, имеющего диаметр, равный ширине ослабленного пространства, но не превышающий этой величины.

Для подземного обрушения над растущим ослабленным пространством в целом характерны те же закономерности и формы проявлений, что и для обрушения над внезапно возникающим ослабленным пространством, однако имеются и некоторые различия в общей картине протекания этих процессов. Обрушение дисперсных пород над постепенно растущими подземными полостями представляет большой интерес для инженерного карстоведения, о чем свидетельствует ряд работ специалистов этого профиля, посвященных теоретическому и экспериментальному изучению данного вопроса (Лукин, 1964; Огоноченко, 1979; Толмачев, 1974; Kammerer, 1962; Penzel, 1980). Вместе с тем эта разновидность процесса гравитационного обрушения интересует и специалистов в области горного дела (Меликян, 1960). К сожалению, исследованиям, посвященным данной проблеме, присуща ярко выраженная односторонняя направленность. Они либо носят сугубо теоретический характер и при этом упускаются из виду некоторые детали, которые отчетливо видны на физических

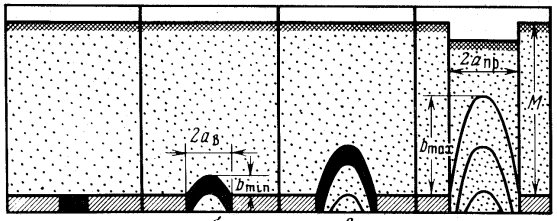


Рис. 23. Общая картина постепенного обрушения песчаных пород над растущим ослабленным пространством

а – отсутствие обрушения; *б* – первоначальный внутренний вывал; *в* – последующий внутренний вывал; *г* – выход обрушения на поверхность в виде провала

моделях (например, дискретность сводообразования), либо не выходят за рамки простой математической интерпретации экспериментального материала. Вместе с тем необходимо отметить, что в работе Р.Б. Давыдько и В.В. Толмачева (1977а) впервые была предпринята попытка объяснить физическую сущность явлений, наблюдавшихся на лабораторных моделях в ходе обрушения дисперсных пород в растущую подземную полость.

Результаты экспериментального изучения процесса гравитационного обрушения песков над растущей карстовой полостью, полученные в лабораторных условиях (Давыдько, Толмачев, 1977а; Лукин, 1964; Меликян, 1960), свидетельствуют о том, что в этом случае вначале не происходит никаких разрушений (рис. 23, *а*) до тех пор, пока полость не достигнет критической ширины $2a_в$, при которой ее кровля уже не может больше держаться в виде плоского "потолка", а затем наблюдается дискретное образование серии вывалов внутри сводов обрушения параболической формы (рис. 23, *б, в*). Это продолжается вплоть до того момента, когда полость достигнет такой ширины ($2a_{пр}$), при которой образуется провал на поверхности грунтового массива (рис. 23, *г*). Аналогичная картина наблюдалась и в ходе опытов на фильтрационной установке в песках зоны аэрации, при постепенном расширении зоны фильтрационного разрушения.

Характерная черта формирования полостей обрушения, оконтуренных сводами равновесия, в данном случае – ярко выраженное изменение крутизны этих сводов по мере увеличения ширины их основания. Первоначальное обрушение (рис. 23, *б*) происходит внутри классического параболического свода, в полном соответствии с теорией Протодьяконова, а каждый последующий свод, начиная со второго (рис. 23, *в*), более вытянут в вертикальном направлении по сравнению с предыдущим. Подземное обрушение выходит на поверхность посредством вертикального сдвижения монолитного грунтового столба над последним сводом обрушения (рис. 23, *г*), а до этого момента происходит образование тем большего количества внутренних вывалов, чем большую мощность имеет перекрывающий слой.

Специальных исследований, посвященных выяснению вопроса о том, каким образом протекает процесс обрушения при дальнейшем росте полости, не проводилось. Однако здесь не вызывают сомнения два обстоятельства: во-первых, такое обрушение будет, так же как и в предшествующий период, протекать дискретно, во-вторых, диаметр провала не сможет превысить ширину подземной полости и в предельной ситуации может стать равным этой величине.

Для того чтобы получить ответ на вопрос, при какой ширине ослабленного пространства, растущего в основании песчаного слоя, может произойти первый провал, необходимо вернуться к решению Бирбаумера относительно условий вертикального сдвижения монолитного грунтового столба. В рассматриваемой ситуации поверхность сдвижения остается прежней, но из веса грунтового столба следует вычесть вес породы, заключенной внутри параболического контура обрушения, имеющего ту же ширину, что и грунтовый столб (см. рис. 23, *г*) и обладающего какой-то неизвестной крутизной f. В этом случае условие равенства сил для плоской задачи будет выглядеть следующим образом:

$$2\gamma Ma - \frac{4\gamma a^2}{3f} = 2CM + \gamma M^2 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\operatorname{tg}\varphi. \qquad (8)$$

Решая это уравнение относительно величины a, получим результат:

$$a = \frac{3}{4}Mf - \sqrt{\left(\frac{3}{4}Mf\right)^2 - \frac{3}{4}Mf\left[M\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\operatorname{tg}\varphi + \frac{2C}{\gamma}\right]}. \qquad (9)$$

В формуле (9) подкоренное выражение не может принять отрицательное значение, а нулю оно может быть равно только в предельном случае, когда над сводом обрушения происходит сдвижение грунтового столба той же ширины. Приравнивая подкоренное выражение нулю и решая полученное уравнение относительно неизвестной величины f, можно найти минимально возможную для данных условий крутизну параболического свода, оконтуривающего полость обрушения, над которой происходит сдвижение монолитного столба:

$$f_{min} = \frac{4}{3}\left[\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)\operatorname{tg}\varphi + \frac{2C}{\gamma M}\right]. \qquad (10)$$

После подстановки найденного значения крутизны последнего свода обрушения в формуле (9) и замены произведения коэффициентов бокового давления и внутреннего трения постоянной величиной можно получить минимальную полуширину ослабленного пространства, вызывающего образование провала:

$$a_{пр} = 0{,}19M + \frac{2C}{\gamma} = a_{min}. \qquad (11)$$

Характер изменения крутизны сводов обрушения по мере роста ширины подземной полости от максимальной величины, при которой становится возможным первоначальное обрушение, до минимальной, обеспечивающей образование провала, показан на рис. 24. В связи с дискретным протеканием процесса график имеет ступенчатую форму, однако кривая, проведенная через середины горизонтальных отрезков графика, имеет вид гиперболы с горизонтальной асимптотой в виде оси абсцисс. О таком же характере изменения кривизны сводов обрушения свидетельствует и

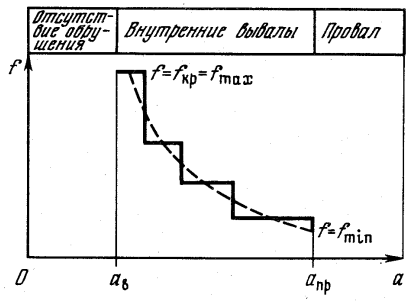


Рис. 24. Характер зависимости крутизны сводов обрушения от ширины ослабленного пространства, постепенно растущего в основании песчаных пород

эмпирическая зависимость, полученная А.А. Меликяном (1960). Конечно, закономерность, представленная на рис. 24, носит идеальный характер и отражает экстремальную ситуацию, так как в реальных условиях, в связи с дискретным протеканием процесса подземного гравитационного обрушения, в большинстве случаев происходит сдвижение монолитного цилиндрического грунтового блока несколько меньшего диаметра над несколько более широким ослабленным пространством. Здесь наблюдается полная аналогия с процессом гравитационного сдвижения грунтового столба над полостью обрушения при внезапном возникновении ослабленной зоны, где сдвижение столба в чистом виде может произойти только в предельном случае.

МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ВОДОУПОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИОННЫХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ СИЛ

Как уже было сказано, карстово-суффозионные процессы будут протекать по-разному в зависимости от того, присутствуют ли в покрывающей толще, помимо подстилающих слабопроницаемых отложений, отделяющих надкарстовые воды от трещинно-карстовых, достаточно мощные и выдержанные слои глинистых пород или нет. Такие слои, как правило, играют роль промежуточных водоупоров. Принципиальные различия в механизме карстово-суффозионных процессов обусловлены здесь тем, что при отсутствии в покрывающей толще промежуточных водоупоров гравитационное обрушение пород будет развиваться над постепенно растущим ослабленным пространством, а при наличии — над внезапно возникающим. В первом случае фильтрационное разрушение водонасыщенных пород развивается в условиях безнапорного подземного потока, а во втором — напорного или слабонапорного.

В последние десятилетия в горном деле успешно применяется аналитическое решение В.Д. Слесарева (Насонов, 1969), полученное им для условий залегания в кровле горной выработки слоя прочных скальных или глинистых пород определенной мощности, перекрытых сверху более рыхлыми отложениями. В основу решения была положена теория сопротивления материалов, при этом рассматривались условия плоской задачи. С.В. Альбов (1948) показал применимость решения Слесарева для целей инженерного карстоведения, если рассматривать карстовую полость как аналог горной выработки. Он учел и то обстоятельство, что в природных условиях кровля карстовой полости может представлять собой водоупор и, следовательно, на нее помимо гравитационных сил могут оказывать воздействие и силы гидростатические.

Как уже отмечалось, формулы В.Д. Слесарева содержат трудноопределимый (особенно для четвертичных суглинков пластичной консистенции) показатель — сопротивление разрыву. С практической точки зрения весьма желательно заменить его показателями сопротивления сдвигу, и именно с этой целью была проведена серия экспериментов на моделях из эквивалентных материалов.

Результаты опытов обрабатывались в соответствии с существующей методикой обработки данных, полученных в ходе экспериментов, спланированных по факторной схеме (Протодьяконов, Тедер, 1970). В итоге была выведена следующая эмпирическая зависимость:

$$a_р = 1{,}51\sqrt{\frac{M_у C_у \operatorname{tg}\varphi_у}{\gamma_у}} - 17, \qquad (12)$$

где $a_р$ — полуширина ослабленного пространства в основании промежуточного водоупора, при которой происходит его полное разрушение, см; $M_у$ — мощность промежуточного водоупора, см; $C_у$ — удельное сцепление пород промежуточного водоупора, 10^2 Па; $\varphi_у$ — угол внутреннего трения пород промежуточного водоупора; $\gamma_у$ — удельный вес пород промежуточного водоупора, 10^4 Н/м^3.

Несмотря на то, что между параметром $a_р$ и величиной, стоящей под корнем в формуле (12), существует тесная связь (коэффициент корреляции составляет 0,86), эта формула не может быть принята для прогнозных расчетов в силу некоторых соображений теоретического характера. Хотя выведенная эмпирическая зависимость имеет такую же структуру, как и формулы В.Д. Слесарева, она не учитывает одного весьма важного обстоятельства: зависимости критической ширины ослабленного пространства, при котором происходит обрушение глинистого слоя, от давления вышележащих пород (в данном случае песков пригрузки), заключенных внутри некоторого контура обрушения (рис. 20, *в*).

Это давление непостоянно прежде всего потому, что в большинстве случаев оно само зависит от величины $a_р$. Что же касается рассматриваемых экспериментов, то такое давление изменялось от опыта к опыту еще и в силу двух дополнительных причин: разнообразия форм обрушения, отмечавшихся в песках пригрузки (внутренние вывалы, различного рода выходы обрушения на поверхность пригрузочного слоя), и неконтролируемого изменения величины удельного веса грунта, перекрывающего глинистый слой, в переводе на натурные условия.

В связи с тем, что в ходе опытов путем фотографирования и переноса на кальку фиксировались все детали общей картины разрушений, протекавших в массиве, и в том числе параметры и конфигурация контуров обрушения песков пригрузки, была предпринята попытка подставить экспериментальные данные в формулу, аналогичную формулам Слесарева. При этом полученная эмпирическая формула отличалась тем, что в ней величина сопротивления глинистых пород разрыву заменялась величиной их удельного сцепления. Принималось также во внимание фактическое снижение величины удельного веса песков пригрузки за счет их трения о переднюю и заднюю стенки стенда.

Если принять нормальное давление песка на стенки стенда равным

боковому распору под действием собственного веса и веса дополнительной пригрузки и допустить, что изменение этого давления с глубиной протекает по линейному закону, а эти допущения вполне приемлемы для рассматриваемых условий (Цытович, 1951), то истинная величина удельного веса песков пригрузки в условиях модели будет определяться формулой

$$\gamma'_{\text{п}} = \gamma_{\text{п}} - f_{\text{тр}} \left(\frac{\gamma_{\text{п}} M_{\text{п}} + p}{m} \right) \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \varphi_{\text{п}}/2), \qquad (13)$$

где $\gamma'_{\text{п}}$ – фактическая величина удельного веса песков пригрузки с учетом трения о стенки стенда; $\gamma_{\text{п}}$ – удельный вес песков пригрузки, равный $1{,}54 \cdot 10^4$ Н/м^3; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения песков пригрузки об органическое стекло, 0,404; $M_{\text{п}}$ – мощность слоя пригрузки; p – дополнительная удельная нагрузка на слой пригрузочных песков, $56 \cdot 10^2$ Па; m – расстояние между передней и задней стенками стенда, 10 см; $\varphi_{\text{п}}$ – угол внутреннего трения песков пригрузки, 38°.

Поскольку в ходе опытов мощность песков пригрузки претерпевала изменения, менялась также и фактическая величина их удельного веса, которая, в свою очередь, при переходе к натурным условиям принимала новое значение за счет масштабного коэффициента (см. табл. 6). Результатом обработки экспериментального материала, включающего в себя данные о давлении пород, перекрывающих глинистый слой, явилась эмпирическая формула

$$a_{\text{р}} = 1{,}43 \sqrt{\frac{M_{\text{у}} C_{\text{у}}}{\gamma_{\text{пр}}}} - 18. \qquad (14)$$

В этой формуле величина $\gamma_{\text{пр}}$ представляет собой так называемый "приведенный" удельный вес, учитывающий помимо веса глинистых пород еще и давление пород, их перекрывающих. Эта величина рассчитывается по формуле

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{S \gamma'_{\text{п}}}{a_{\text{р}} M_{\text{у}}} + \gamma_{\text{у}}, \qquad (15)$$

где S – полуплощадь лицевой поверхности песков пригрузки внутри контура их обрушения.

Коэффициент корреляции между предельной полушириной ослабленного пространства воронкообразной полости и величиной квадратного корня от мощности глинистого слоя, умноженной на удельное сцепление слагающих его пород и деленной на приведенный удельный вес, равен 0,84. Таким образом, по тесноте связи между параметрами эмпирическая формула (14) практически не уступает формуле (12), но она в большей степени отражает физический смысл рассматриваемого процесса и поэтому более предпочтительна для практического использования.

Линейный график корреляционной зависимости (14), совмещенный с точечной диаграммой экспериментальных данных, представлен на рис. 25. При выводе эмпирической зависимости в обработку были дополнительно включены данные, полученные в ходе проведения опытов с песками

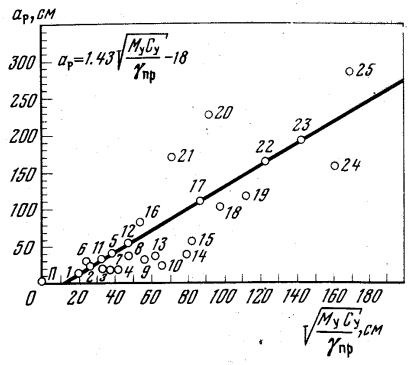


Рис. 25. Линейный график корреляционной зависимости полуширины верхней части воронкообразной полости, над которой происходит полное разрушение промежуточного водоупора, от параметров слагающих его и перекрывающих пород

Цифры – номера опытов

пригрузки (точка П на графике) при отсутствии глинистого слоя как такового, т.е. при его нулевой мощности.

Для перехода от формулы (14) к натурным условиям, т.е. к условиям, когда глинистый слой является водоупором, следует в величине приведенного удельного веса учесть помимо гравитационных сил еще и силы гидростатические, противодействующие гравитационным. Формула для расчета приведенного удельного веса должна в этом случае принять следующий вид:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{S \gamma_{\text{п}}}{a_{\text{р}} M_{\text{у}}} + \gamma_{\text{у}} - \frac{H \gamma_w}{M_{\text{у}}}, \qquad (16)$$

где H – пьезометрический напор лежащего ниже водоносного горизонта; γ_w – удельный вес воды, приблизительно равный 10^4 Н/м^3.

Из формулы (14) вытекает, что ослабленное пространство, над которым происходит разрушение водоупорного слоя, имеет тем меньшую предельную ширину, чем больше величина приведенного удельного веса, а формула (16), в свою очередь, показывает, что приведенный удельный вес возрастает с ростом удельного веса пород, перекрывающих водоупор, и с уменьшением напора воды в лежащем ниже водоносном горизонте. Оба эти параметра весьма чувствительны к внешним воздействиям на подземную гидросферу, в результате чего в природе часто наблюдается сопровождаемое провалообразованием разрушение водоупоров, перекрывающих древние незакольматированные карстовые полости. Обычно это происходит либо при локальном обводнении лежащих выше песчаных пород, которое приводит к увеличению их удельного веса (Wilk, Motyka, Niewdana, 1973), либо при снижении напора трещинно-карстовых вод (Кутепов, 1983; Плотников, Дубейковский, 1976).

В том случае, когда обрушение пород, перекрывающих водоупорный слой, достигает поверхности, т.е. на водоупор начинает давить монолитный столб с вертикальными стенками, величина приведенного удельного веса перестает зависеть от предельной ширины ослабленного пространства и становится равной

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{п}} \gamma_{\text{п}}}{M_{\text{у}}} + \gamma_{\text{у}} - \frac{H \gamma_w}{M_{\text{у}}}, \qquad (17)$$

где $M_п$ и $\gamma_п$ – соответственно мощность и удельный вес пород, перекрывающих водоупорный слой.

При этом формула (14), с учетом того обстоятельства, что для природных условий можно пренебречь свободным коэффициентом, равным всего лишь 18 см, примет вид

$$a_р = 1{,}43\sqrt{\frac{C_у M_у^2}{M_п\gamma_п + M_у\gamma_у - H\gamma_w}} = a_{min}. \qquad (18)$$

Эта формула определяет минимальную полуширину пространства, неспособного служить опорой водоупорному слою, в случае превышения которой происходит его полное разрушение, сопровождающееся образованием провала на поверхности земли.

МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСКОВ В НИСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ

В том случае, когда в водоупорном слое, отделяющем трещинно-карстовые воды от надкарстовых, существует сквозное нарушение сплошности, а пьезометрический напор трещинно-карстовых вод снижен относительно уровня или напора надкарстовых вод, в водонасыщенных породах покрывающей толщи, залегающих непосредственно над подстилающим водоупором, возникает сложный фильтрационный поток, имеющий во всех точках своего пространства, за исключением приграничных областей, направленную вниз вертикальную составляющую (рис. 26). Гидродинамическому воздействию этого потока, стремящемуся разрушить водовмещающие породы, противодействуют силы сопротивления этих пород сдвигу и разрыву в условиях определенного напряженного состояния, которое, в свою очередь, зависит от действия гидростатических сил.

Величина гидродинамического давления D на элементарную площадку в какой-либо точке рассматриваемого фильтрационного потока будет определяться формулой

$$D = \gamma_w (H_1 - h), \qquad (19)$$

где h – напор воды в данной точке.

Направление гидродинамического давления совпадает с направлением касательной к линии тока, проходящей через данную точку области фильтрации. В тех точках массива, где силы, противодействующие разрушающему гидродинамическому давлению, не обладают достаточной величиной, происходит полное фильтрационное разрушение структуры пород.

Пространственной границей этого процесса будет служить поверхность (в условиях плоской задачи – линия), во всех точках которой гидродинамическое давление уравновешено силами внутреннего сопротивления породы разрушению. За пределами этой поверхности или линии порода полностью сохраняет свою структурную прочность. Уравнение, описывающее линию границы фильтрационного разрушения, имеет сложный вид, однако, как показывают опыты (см. рис. 16), эту границу с большой степенью точности можно аппроксимировать как параболу, обращенную вершиной вниз, с высотой, равной мощности зоны насыщения и с некото-

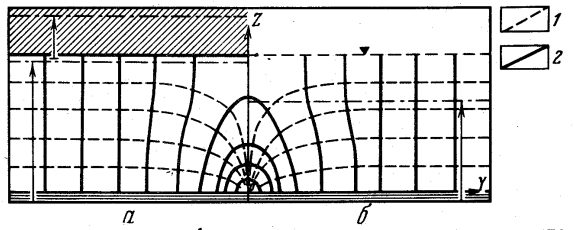


Рис. 26. Структура нисходящего фильтрационного потока, возникающего в однородных покрывающих песчаных породах при перетоке напорных (*а*) и безнапорных (*б*) надкарстовых вод в трещинно-карстовый водоносный горизонт через сквозное нарушение в водоупоре

1 – линия тока; *2* – линия равного напора

рой полушириной основания a. Вертикальные напряжения вдоль линии границы будут определяться собственным весом взвешенного в воде песка в пределах контура фильтрационного разрушения, а также весом пород зоны аэрации (безнапорный поток) или пород, слагающих водоупорный слой и лежащих выше этого слоя (напорный поток), в случае, когда ширина зоны фильтрационного разрушения превышает критическую величину и над ней происходит обрушение перекрывающих пород.

На поверхности рассматриваемого подземного потока граница фильтрационного разрушения будет проходить через точки, где горизонтально направленное гидродинамическое давление равно сопротивлению породы разрыву в условиях наличия бокового противодавления, определяющегося вертикальной нагрузкой от блока, отделившегося в результате гравитационного обрушения. В соответствии с характером этого обрушения граничная величина гидродинамического давления на поверхности области фильтрации $D_{гр}$ в случае провалообразования равна для безнапорного потока

$$D_{гр} = R_р + \gamma_а M_а \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_н/2), \qquad (20)$$

где $R_р$ – сопротивление водонасыщенного песка разрыву; $\gamma_а$ – удельный вес пород зоны аэрации; $M_а$ – мощность зоны аэрации; $\varphi_н$ – угол внутреннего трения водонасыщенного песка.

В условиях же напорного потока вертикальное напряжение в граничной точке и, следовательно, боковое давление будут определяться уже тремя факторами: давлением обрушившихся пород водоупорного слоя, давлением сместившегося при образовании провала вертикального столба лежащих выше пород и гидростатическим противодавлением напора воды. Условие равновесия этих сил выглядит следующим образом:

$$D_{гр} = R_р + (\gamma_у M_у + \gamma_п M_п - \gamma_w H)\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_н/2). \qquad (21)$$

В определенных условиях горизонтальное гидродинамическое давление на верхней границе потока может не достигнуть величины, необходимой для преодоления сопротивления породы разрыву, даже при отсутствии вертикальных нагрузок, связанных с обрушением лежащих выше пород. Однако величины, равной сопротивлению разрыву, может достигнуть

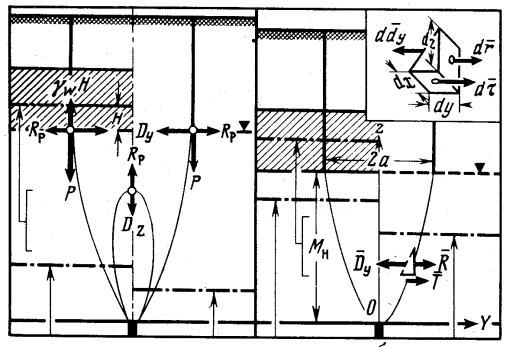


Рис. 27. Схемы, иллюстрирующие действие сил при фильтрационном разрушении водонасыщенных песков нисходящим потоком в крайних верхних точках (*а*) и в произвольной точке (*б*) границы зоны фильтрационного разрушения

вертикальное гидродинамическое давление на центральной оси области фильтрации (рис. 27, *а*). При этом контур зоны фильтрационного разрушения будет замкнут в пределах зоны насыщения и своей конфигурацией будет напоминать полулемнискату (см. рис. 15) или эллипс (см. рис. 18). Замкнутый контур суффозионной области превратится в разомкнутый тогда, когда гидродинамическое давление в верхней точке центральной оси достигнет величины, равной сопротивлению породы разрыву. Это условие может быть достигнуто уже при весьма малом снижении пьезометрического напора трещинно-карстовых вод относительно уровня или напора вод надкарстовых. Принимая во внимание значения показателей сопротивления песков разрыву (Черняк, 1976), такое снижение измеряется всего лишь первыми десятками сантиметров. Отсюда следует вывод, что при наличии достаточно мощных постоянных водоносных горизонтов в покрывающих породах, в условиях реальной возможности фиксации уровней и напоров подземных вод в ходе буровых работ не имеет смысла рассматривать условия формирования замкнутых контуров фильтрационного разрушения.

Что касается зоны фильтрационного разрушения, целиком пронизывающей водоносный горизонт на всю его мощность, то она в любом случае имеет определенную полуширину a по верхней границе области фильтрации. Рассмотрим в условиях плоской задачи элементарный объем породы в вертикальном слое элементарной толщины, расположенный на границе зоны фильтрационного разрушения (рис. 27, *б*). Этот объем можно представить в виде горизонтально расположенной прямой призмы с длиной ребра dx, имеющей в основании прямоугольный треугольник со сторонами dy и dz. На такую призму действует горизонтальная составляющая гидродинамического давления, которой противостоят две элементарные силы: сопротивления разрыву по вертикальной боковой грани призмы и сопротивления сдвигу, действующего по касательной к горизонтальной боковой грани в условиях давления элементарного вертикального грунтового столба, высотой до границы контура обрушения пород, перекрывающих водоносный горизонт. Равновесие всех сил, действующих по контуру фильтрационного разрушения, будет определяться равенством

$$\bar{D}_y = \bar{R} + \bar{T}, \tag{22}$$

где $\bar{D}_y$ – векторная сумма горизонтальных составляющих гидродинамического давления (по площади проекции границы зоны фильтрационного разрушения на вертикальную плоскость); $\bar{R}$ – векторная сумма сил сопротивления разрыву (по площади проекции границы зоны фильтрационного разрушения на вертикальную плоскость); $\bar{T}$ – векторная сумма сил сопротивления сдвигу (по площади проекции границы зоны фильтрационного разрушения на горизонтальную плоскость).

В свою очередь, сопротивление сдвигу определяется вертикальным давлением по площади сдвига:

$$\bar{T} = \bar{P}\operatorname{tg}\varphi_н + C_н, \tag{23}$$

где $\bar{P}$ – векторная сумма давлений от собственного веса элементарных грунтовых столбов, высотой до границы контура обрушения пород, перекрывающих водоносный горизонт (по площади проекции границы зоны фильтрационного разрушения на горизонтальную плоскость).

Изменение горизонтальной составляющей гидродинамического давления по длине границы фильтрационного разрушения от величины $D_{гр}$ в верхней точке до величины $\gamma_w(H_1 - H_0)$ в нижней точке этой линии можно с достаточной точностью представить протекающим по параболическому закону и аппроксимировать функцией

$$D_y = \gamma_w(H_1 - H_0) - \frac{\gamma_w(H_1 - H_0) - D_{гр}}{\sqrt{s}}\sqrt{u}, \tag{24}$$

где u – координата расстояния от сквозного нарушения в водоупоре до данной точки по линии границы зоны фильтрационного разрушения; s – длина границы зоны фильтрационного разрушения.

Из выражения (24) путем его интегрирования можно получить среднее значение горизонтальной составляющей гидродинамического давления по длине граничной линии, от которого нетрудно перейти к суммарной силе гидродинамического давления:

$$D_y = \frac{1}{3}[\gamma_w(H_1 - H_0) + 2D_{гр}]M_н dx. \tag{25}$$

Суммарная сила сопротивления разрыву составит

$$R = R_р M_н dx. \tag{26}$$

Что же касается суммарной силы сопротивления сдвигу в условиях провалообразования, то с учетом параболической аппроксимации границы зоны фильтрационного разрушения, о чем говорилось выше, а также того факта, что в зоне насыщения пески находятся во взвешенном состоянии, эта сила будет определяться для безнапорного потока формулой

$$T = \left[\frac{2}{3}\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)H_1 + \gamma_а M_а\right]a\operatorname{tg}\varphi_н dx, \tag{27}$$

где γ_s – удельный вес песчаных частиц, приблизительно равный 2,66

$\cdot 10^4$ Н/м^3; $e_н$ – коэффициент пористости водонасыщенного песка, а для напорного потока – формулой

$$T = \left[\frac{2}{3}\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)M_н + \gamma_y M_y + \gamma_п M_п - \gamma_w (H_1 - M_н)\right] a \operatorname{tg}\varphi_н dx. \quad (28)$$

При этом принимается во внимание, что водонасыщенные пески имеют практически нулевое сцепление (параметр линейности).

После подстановки выражений, определяющих величины суммарных сил, в равенство (22) и производства необходимых сокращений можно получить формулы для безнапорного и напорного потоков:

$$[\gamma_w (H_1 - H_0) + 2D_{гр}]H_1 = 3R_р H_1 + \left[2\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)H_1 + 3\gamma_а M_а\right] a \operatorname{tg}\varphi_н; \quad (29)$$

$$[\gamma_w (H_1 - H_0) + 2D_{гр}]M_н = 3R_р M_н + \left[2\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)M_н + 3\gamma_y M_y + 3\gamma_п M_п - 3\gamma_w (H_1 - M_н)\right] a \operatorname{tg}\varphi_н. \quad (30)$$

Подставляя в эти формулы выражения (20) и (21), определяющие соответствующие величины граничного гидродинамического давления, и решая полученные таким образом линейные уравнения относительно величины a, нетрудно найти максимально возможную полуширину зоны фильтрационного разрушения. Для безнапорного потока эта величина будет равна

$$a_{max} = \frac{H_1 [\gamma_w (H_1 - H_0) + 2\gamma_а M_а \operatorname{tg}^2 (45° - \varphi_н/2)]}{\left[2\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)H_1 + 3\gamma_а M_а\right]\operatorname{tg}\varphi_н}. \quad (31)$$

Для напорного потока она будет определяться несколько более сложной формулой

$$a_{max} = \frac{\left\{M_н \gamma_w (H_1 - H_0) + 2 [\gamma_y M_y + \gamma_п M_п \gamma_w (H_1 - M_н)] \operatorname{tg}^2 (45° - \varphi_{н/2})\right\}}{\left\{2\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right)M_н + 3 [\gamma_y M_y + \gamma_п M_п - \gamma_w (H_1 - M_н)]\right\}\operatorname{tg}\varphi_н}. \quad (32)$$

Предложенные формулы отражают натурные условия и масштабы развития процесса фильтрационного разрушения, в связи с чем при их выводе были опущены величины сопротивления песчаных пород разрыву, как имеющие весьма малые значения, которые можно не принимать в расчет.

Расчетное определение ширины сквозного нарушения в подстилающем водоупоре, обеспечивающей максимально возможное фильтрационное разрушение водонасыщенных песков, в принципе возможно, но в настоящее время крайне затруднительно. Это связано с отсутствием аналитического решения рассматриваемой в данной работе фильтрационной задачи, которая в динамике подземных вод до сих пор вообще не ставилась. Что же касается непосредственного определения ширины сквозного нарушения в природных условиях, то здесь приходится с сожалением констатировать

невозможность таких определений на современном техническом уровне инженерных изысканий.

Вместе с тем результаты лабораторного физического моделирования карстово-суффозионных процессов на фильтрационной установке свидетельствуют о том, что именно ширина сквозного нарушения в подстилающем водоупоре определяет условия развития процесса вязкопластического течения водонасыщенных песков, подвергшихся фильтрационному разрушению в нисходящем потоке.

Это обстоятельство не позволяет использовать в качестве детерминированных математических моделей истечения песков в карстовые трещины и полости эмпирические формулы, выведенные на основе экспериментальных данных, полученных в ходе лоткового моделирования (см. табл. 5). В то же время существующие теоретические решения и основанные на них математические построения, служащие для описания процесса движения вязких и сыпучих сред, отличаются большой сложностью и требуют знания некоторых трудноопределимых параметров истекающей массы.

В предыдущих разделах отмечалось, что глубина провалов, формирующихся в соответствии со схемами, представленными на рис. 21, *б, в*, зависит от условий протекания процесса вязкопластического течения водонасыщенных песков. Отсюда следует, что использование прогнозных расчетно-теоретических решений, однозначно определяющих глубину карстово-суффозионных провалов, в настоящее время не представляется возможным.

МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ

Как подчеркивают многие авторы, занимавшиеся изучением процесса разжижения водонасыщенных песков (Иванов, 1962; Флорин, 1961), граничные условия его возникновения можно описать математически в виде неявной дискриминантной функции, связывающей между собой основные параметры, отражающие характер вызывающего разжижение разрушающего воздействия и сил сопротивления этому воздействию, присущих какому-то конкретному виду разжижения. Фактический материал, полученный в ходе опытов на фильтрационной установке (см. табл. 4), в принципе позволяет получить подобного рода эмпирическую дискриминантную функцию для рассматриваемого вида разжижения, однако это не имело бы практической значимости, поскольку такая функция должна содержать в качестве весьма важного аргумента ширину сквозного нарушения в водоупоре.

Дело также состоит в том, что этот показатель практически неопределим, но главным образом в том, что в рассматриваемом процессе он выступает не в качестве аргумента, непрерывно растущего от нуля, а в качестве внезапно возникающего параметра определенной величины. В первом случае, как это, например, имеет место при фильтрационном разрушении, в нисходящем потоке можно выделить определенные пороговые значения этой величины на входе в систему, во втором – такой возможности нет. Что же касается грубой оценки граничных условий возникновения процесса ползучего разжижения, то с полным основанием можно утверждать, что этот

процесс полностью исключается при снижении напора трещинно-карстовых вод ниже отметки кровли вышележащего водоупора.

Разжиженный песок до такой степени утрачивает структурную прочность, что ведет себя уже не как вязкопластичная, а скорее как сыпучая среда. Именно этим и объясняется своеобразная форма полостей разжижения (см. рис. 12), формирующихся за счет истечения разжиженной массы через сквозное нарушение в водоупоре. По мере скачкообразного роста такой первоначальной треугольной полости угол наклона ее боковых границ к горизонтальной плоскости, в первый момент довольно крутой, начинает постепенно выполаживаться и в конечном счете достигает угла естественного откоса под водой. Это явление, по-видимому, связано с наличием все более уменьшающейся по мере роста высоты полости разжижения нагрузки от веса лежащих выше пород.

Процесс ползучего разжижения сам по себе и каждая его фаза в отдельности завершаются разрушением заполненной водой неустойчивой полости вследствие гравитационного обрушения расположенного над ней монолитного блока. При этом высота, которой достигает верхняя граница полости разжижения, не может превысить отметки пьезометрического напора трещинно-карстовых вод H_0. Таким образом, нетрудно видеть, что максимально возможная полуширина верхней части неустойчивой полости разжижения будет равна

$$a_{max} = H_0/\mathrm{tg}\,\alpha_в, \qquad (33)$$

где $\alpha_в$ – угол естественного откоса водонасыщенного песка.

Конечно, в большинстве случаев заключительная фаза процесса будет сопровождаться разрушением неустойчивой полости, имеющей меньшую ширину, поскольку развитие ползучего разжижения протекает дискретно.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОГО ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Любой процесс, протекающий в какой-либо среде, может рассматриваться как последовательное и определенно направленное изменение ее состояния и свойств. Экзогенные геологические процессы в ходе своего развития также способны оставлять заметный след в структуре полей некоторых геологических параметров на локальном уровне (Бондарик, 1981). Если бы имелась принципиальная возможность знать величину какого-либо параметра геологической среды, связанного с конкретным геологическим процессом, в любой точке массива, в любой момент времени, то можно было бы получить аналитическую зависимость, описывающую динамику развития этого процесса. Такая зависимость представляет собой функцию, где в качестве аргументов выступают три координаты пространства и время.

Карстово-суффозионные процессы не являются в этом смысле исключением, так как они представляют собой закономерную и последовательную цепь гидродинамических и гравитационных разрушений, развивающихся в породах покрывающей толщи непосредственно над подземными карстовыми формами. Их крайним выражением являются различные деформации земной поверхности, но еще задолго до этого карстово-суффозионные процессы проходят ряд четких фаз и стадий в своем развитии, причем наибольший интерес с точки зрения прогнозирования представляют самые ранние, подготовительные стадии.

В определенных условиях эти стадии в принципе могут быть зафиксированы, если каким-то образом установлен закон пространственного распределения некоторых параметров пород покрывающей толщи. Такой закон может быть получен с помощью аппарата тренд-анализа в соответствии с теорией, разработанной Г.К. Бондариком (1971), и будет представлять собой типичную статистическую модель какого-либо процесса-компонента, входящего в совокупность "карстово-суффозионные процессы".

Так, например, в случае, когда пески, в которых протекают фильтрационные разрушения, представлены так называемыми суффозионными разновидностями, что может быть легко оценено по известным критериям (Кондратьев, 1958), разрушению их скелетной структуры будет предшествовать вынос тонких фракций сквозь поры скелета. При этом интенсивность гидродинамического воздействия на породу должна нарастать постепенно, а не принимать форму скачка. В этих условиях большое значение приобретает пространственное распределение такого показателя, как процентное содержание фракций заполнителя, поскольку, по мнению большинства исследователей, занимающихся этим вопросом (Истомина 1957; Лыкошин, 1976; Патрашев, 1938; Kálin, 1977), вынос тонких фракций начинается на выходе фильтрационного потока и в дальнейшем распространяется регрессивно в глубь массива. Эта особенность процесса гидродинамического перемещения мелких частиц в поровом пространстве находит выражение в перераспределении гранулометрического состава песков – явлении, которое в натурных условиях отмечается, например при устройстве бесфильтровых скважин (Логинов, 1977), а также вблизи карстово-суффозионных провалов (Хоменко, 1982).

Другим примером может служить ситуация, когда в зоне аэрации на некоторой глубине происходит обрушение пород, приводящее к образованию подземных обвальных полостей. Такие полости могут практически не проявлять себя на поверхности массива, однако внутри него будет отмечаться перераспределение напряжений, сопровождающееся разуплотнением пород так, как это происходит при проходке горных выработок (Паньков, 1978). Степень и границы такого разуплотнения найдут отражение в пространственном распределении коэффициента пористости или показателей зондирования.

Таким образом, имеется реальная возможность, опираясь на знание закона пространственного распределения процентного содержания тонких фракций в песках зоны насыщения, выявлять самые ранние стадии суффозионного процесса еще до начала необратимых деформаций в скелете грунта и, зная аналогичный закон для коэффициента пористости или показателей зондирования в породах зоны аэрации, фиксировать стадию гравитационного обрушения, предшествующую провалообразованию.

С точки зрения возможностей построения статистических математических моделей, последний случай представляет собой бо́льший практический интерес, чем первый, по двум причинам: во-первых, для того чтобы построение модели фильтрационного разрушения было в принципе возможным, необходимо, чтобы водонасыщенные пески были "суффозионными", т. е. имели определенные структурно-текстурные особенности; во-вторых, статическое и динамическое зондирование дает гораздо более представительный материал для статистической обработки по сравнению с любым точечным опробованием. Именно поэтому статистическая модель карстово-суффозионного провалообразования наиболее эффективно может быть представлена в виде модели разуплотнения пород зоны аэрации, вызванного их подземным обрушением.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОГО ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

В качестве первого опыта использования математических моделей случайных функций для вероятностно-статистической оценки карстово-суффозионной опасности автором были получены формулы, характеризующие закономерности пространственного развития процессов разуплотнения песчаных пород зоны аэрации, связанных с их подземным обрушением, для условий двух регионов. При выводе уравнений тренда показателей зондирования в обработку включались не осредненные, а экстремальные точечные значения параметров, снятые с зондировочных кривых. При этом значительно увеличивался разброс исходных данных, но зато свойства пород характеризовались с наибольшей полнотой. Уравнения выводились не для всей зоны аэрации в целом, а для отдельных, выдержанных по простиранию литологических разностей песчаных пород, выделяемых в соответствии с градациями, принятыми при инженерно-геологических изысканиях (Справочник..., 1981).

Первоначально отстроенные модели (Хоменко, 1978) имели вид полных квадратных уравнений, что резко повышало тесноту связи между результативными и факториальными признаками. Однако неполные квадратные уравнения, описывающие центрально-симметричное семейство осесимметричных поверхностей второго порядка, в большей степени соответствуют теоретической картине распределения напряжений вокруг подземной полости; именно поэтому они и были взяты за основу окончательных статистических моделей. Вывод уравнений тренда и расчет полиноминальных коэффициентов осуществлялись путем обращения матриц способом Дулиттла (Крамбейн, Грейбилл, 1969).

В 1975 г. Фундаментпроект Минмонтажспецстроя СССР проводил в одном из северо-западных районов Москвы инженерные изыскания для строительства административного здания. Участок изысканий располагался в том месте, где в октябре 1969 г., на расстоянии 13 м друг от друга, внезапно образовались два цилиндрических провала карстово-суффозионного происхождения. Сформировавшиеся на их месте провальные воронки впоследствии слились в одну, диаметром более 20 м. Грунтовые воды на участке изысканий присутствуют на глубине 20–22 м, а зона аэрации имеет следующее геологическое строение: под на-

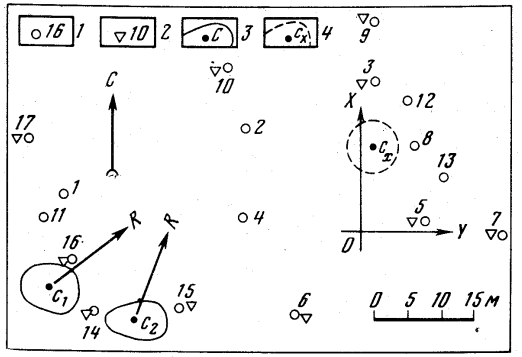


Рис. 28. План расположения разведочных скважин и точек зондирования на участке карстово-суффозионных провалов 1969 г.

1 – разведочная скважина и ее номер; *2* – точка статического зондирования и ее номер; *3* – существующий карстово-суффозионный провал; *4* – предполагаемый карстово-суффозионный провал

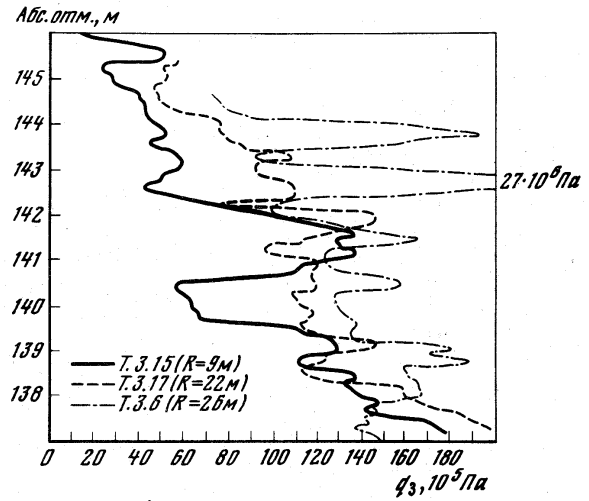


Рис. 29. Сопоставление графиков статического зондирования песков средней крупности на участке карстово-суффозионных провалов 1969 г.

сыпью, мощностью до 7 м, залегают среднечетвертичные аллювиальные и флювиогляциальные пески различного гранулометрического состава. В изыскания входило статическое зондирование с помощью установки С-979. Точки зондирования располагались чисто случайно относительно центра провальной зоны (рис. 28), однако простое совмещение графиков (рис. 29) позволило сделать вывод о наличии определенных закономерностей в пространственном распределении параметра статического зонди-

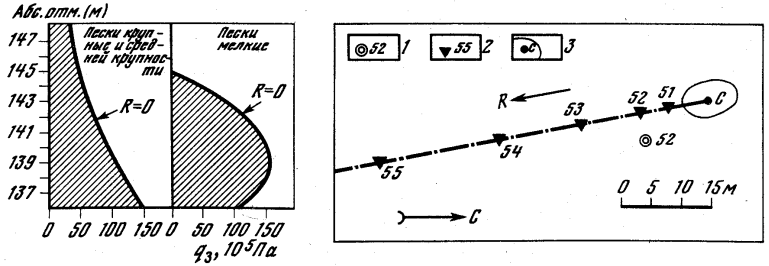


Рис. 30. Расчетные значения показателя статического зондирования для осевых точек карстово-суффозионных провалов 1969 г.
Заштрихованы области критических значений

Рис. 31. План расположения разведочных скважин и точек зондирования на участке карстово-суффозионного провала 1979 г.
1 – разведочная скважина и ее номер; *2* – точка динамического зондирования и ее номер; *3* – карстово-суффозионный провал

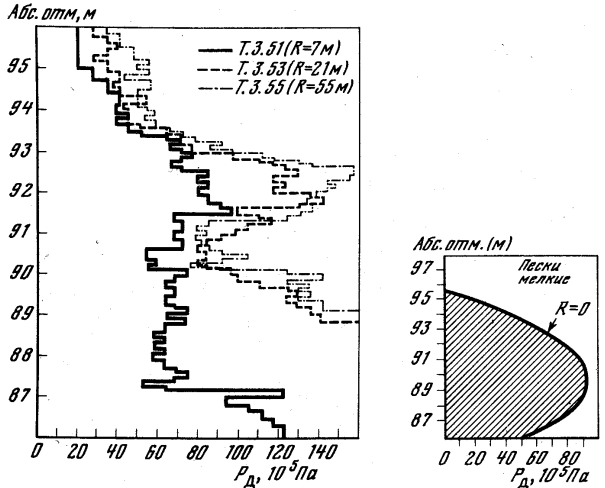


Рис. 32. Сопоставление графиков динамического зондирования мелких песков на участке карстово-суффозионного провала 1979 г.

Рис. 33. Расчетные значения показателя динамического зондирования для осевой точки карстово-суффозионного провала 1979 г.
Заштрихована область критических значений

рования: во-первых, с удалением от зоны карстово-суффозионных провалов сопротивление конусу зонда увеличивается, во-вторых, закономерное возрастание этой величины с глубиной происходит тем резче, чем дальше точка зондирования расположена от провальной зоны. Эти закономерности четко прослеживаются лишь в пределах 40-метровой зоны удаления от провальных воронок. Что же касается восточной группы точек статического

зондирования, то для них наблюдается аналогичная закономерность, но уже относительно какого-то другого, неизвестного центра, о чем подробно будет сказано в дальнейшем.

После соответствующей статистической обработки были выведены уравнения тренда показателя статического зондирования, имеющие вид для песков крупных и средней крупности:

$$q_з = 276 - 24{,}7Z + 0{,}634Z^2 + 0{,}071R^2 \qquad (34)$$

и для мелких песков

$$q_з = -258 + 90{,}1Z - 4{,}92Z^2 + 0{,}117R^2, \qquad (35)$$

где $q_з$ – удельное сопротивление пород конусу зонда при статическом зондировании, 10^5 Па; Z – абсолютная отметка данной точки пространства минус 130 м, м; R – расстояние в горизонтальной плоскости от данной точки до центра ближайшего провала, м.

Дисперсия от поверхностей тренда составляет в первом случае 42%, а во втором – 33% дисперсии от среднего, т. е. в первом случае тренд точнее в 2,5, а во втором – в 3 раза.

После подстановки в формулы (34) и (35) координат центра провальной зоны ($R = 0$) можно получить уравнения границ областей минимальных (или критических) значений показателей зондирования и отстроить соответствующие графики-палетки (рис. 30). При совмещении подобных графиков с кривыми статического зондирования, полученными в определенных точках в ходе инженерно-геологических изысканий на отдельных площадках, можно делать выводы о наличии или отсутствии центров разуплотнения.

В июне 1979 г. в окрестностях г. Дзержинска Горьковской области образовался сводообразный карстово-суффозионный провал, вначале имевший крайне незначительный диаметр, но вскоре резко расширившийся за счет обрушения нависающих песчаных карнизов. В августе диаметр провальной воронки достигал уже 8 м. По литературным данным, уровень грунтовых вод на рассматриваемой территории расположен на глубине 25–30 м, а зона аэрации представлена среднечетвертичными аллювиальными, в основном мелкими песками.

В ноябре того же 1979 г. на участке провала сотрудниками Центральной экспедиции Гидропроекта Минэнерго СССР, по рекомендации автора настоящей работы, было проведено динамическое зондирование песков зоны аэрации с помощью установки УБП-15 и пройдена одна разведочная скважина глубиной 16 м. На этот раз точки зондирования были расположены строго по прямой линии, исходящей в виде луча из центра провала (рис. 31). Сопоставление графиков динамического зондирования (рис. 32), так же как и в предыдущем случае, недвусмысленно свидетельствовало о нарастающем разуплотнении песчаных пород с приближением к провальной воронке.

Обработка материалов динамического зондирования позволила получить квазифункциональную зависимость его показателя от координат пространства для мелких маловлажных песков:

$$p_д = -182 + 55{,}8Z - 2{,}82Z^2 + 0{,}0229R^2, \qquad (36)$$

где $p_д$ – условное динамическое сопротивление пород при ударном зонди-

ровании, 10^5 Па; Z — абсолютная отметка данной точки пространства минус 80 м, м.

Дисперсия от поверхности тренда составляет 72% дисперсии от среднего. Это означает, что тренд точнее в 1,5 раза. Критические значения параметра динамического зондирования лежат в области, показанной графически на рис. 33.

В заключение следует отметить, что предлагаемые статистические модели отнюдь не носят характера окончательных прогнозных формул. Скорее, их следует рассматривать в качестве удобного способа количественного описания определенных закономерностей, связанных с развитием подземного гравитационного обрушения песков зоны аэрации и сопровождающих его процессов, как одного из видов карстово-суффозионных разрушений.

ПРОГНОЗ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОГО ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ

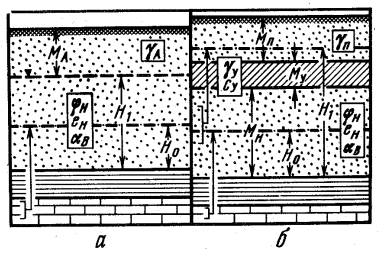
Автор настоящей работы вслед за Л.Б. Розовским и И.П. Зелинским (1975) понимает под региональными инженерно-геологическими прогнозами такие прогнозы, которые характеризуют условия района строительства комплекса сооружений (промузла, населенного пункта и т.п.). При этом границы района устанавливаются в зависимости от целей прогноза (Бондарик, 1972). В основе предлагаемого автором способа регионального прогнозирования (оценки) провальной карстово-суффозионной опасности лежат детерминированные математические модели карстово-суффозионных разрушений (их описание приводится в соответствующем разделе данной книги). Таким образом, этот способ прогноза следует отнести к группе расчетно-теоретических методов (Ломтадзе, 1977).

Применение детерминированных математических моделей в геологии и других науках о Земле неизбежно вызывает необходимость определенной схематизации природных условий, к которым привязываются данные модели. Использование расчетно-теоретических методов прогноза карстово-суффозионных процессов также требует схематизации геологической среды, где они протекают или способны протекать. На рис. 34 показаны схемы, иллюстрирующие один из возможных принципов такой схематизации для двух типов природных условий с различным геолого-гидрогеологическим строением покрывающей толщи, содержащей постоянные водоносные горизонты. В первом случае (рис. 34, *а*) горизонт надкарстовых вод имеет безнапорный характер и является ближайшим к поверхности водоносным горизонтом, а во втором (рис. 34, *б*) — он перекрыт водоупорным слоем, и присутствующие в нем подземные воды обладают слабым пьезометрическим напором. При этом надкарстовые воды отделены от трещинно-карстовых подстилающим водоупором, и следовательно, в общей схеме типизации природных условий развития карстово-суффозионных процессов (см. рис. 6) рассматриваемые условия относятся к типу Г.

В подобной инженерно-геологической обстановке более или менее полная однозначность будет присуща только некоторым показателям макроструктуры массива, что же касается величин уровней и напоров подземных

Рис. 34. Схематизированные природные условия, в которых формируются карстово-суффозионные провалы при отсутствии (*а*) и при наличии (*б*) в покрывающей толще промежуточных водоупоров

Обозначения см. рис. 21



вод, а также свойств пород покрывающей толщи, то они имеют ярко выраженную статистическую природу. Кроме того, песчаные породы зон насыщения и аэрации и глинистые породы водоупоров могут разделяться на отдельные слои, сложенные литологическими разностями, обладающими различными инженерно-геологическими свойствами. Учитывая эти обстоятельства, в качестве расчетных величин исходных параметров следует использовать среднемноголетние значения показателей режима подземных вод (Справочное руководство ..., 1979) и средневзвешенные величины показателей физических и физико-механических свойств пород, по мощностям условно однородных толщ водонасыщенных песков, песков зоны аэрации и глинистых пород промежуточных водоупоров.

При прогнозировании карстово-суффозионного провалообразования, вызванного фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком в условиях естественного режима подземных вод, в расчет включаются максимальные среднемноголетние значения уровней и напоров надкарстовых вод и минимальные среднемноголетние величины напоров вод трещинно-карстовых, а при нарушенном режиме последних — минимально возможные величины напоров. Если же речь идет о прогнозе провалообразования, вызванного ползучим разжижением, то в расчетные формулы должны вводиться максимальные среднемноголетние значения напоров трещинно-карстовых вод или максимально возможные при нарушенном режиме.

Из общей теории прогностики (Лисичкин, 1972) известно, что прогнозирование может осуществляться только на фоне некоторых стабильных параметров, практически не меняющихся в пространстве и во времени. В рассматриваемом случае в роли подобных параметров выступают показатели свойств покрывающих пород (за исключением удельного веса песчаных пород, перекрывающих промежуточный водоупор) и мощности отдельных слоев (за исключением мощностей зон аэрации и насыщения). Все остальные показатели, входящие в расчетные формулы, можно считать стабильными параметрами только при отсутствии техногенных воздействий на подземную гидросферу.

Сущность предлагаемого способа регионального прогнозирования карстово-суффозионного провалообразования заключается в определении максимально возможных диаметров провалов и достаточных условий их формирования. В предыдущих разделах книги было показано, что каждое из элементарных карстово-суффозионных разрушений, приводящих к формированию провала, имеет свои собственные закономерности и границы

протекания. В частности, для ослабленных зон, с которыми связано подземное обрушение покрывающих пород, принимающее в экстремальных случаях вид провалообразования, существуют четкие пределы роста. Это принципиально отличает карстово-суффозионное провалообразование, протекающее при наличии в покрывающих породах постоянных водоносных горизонтов, от карстово-обвального, в ходе которого обрушение происходит над растущими вследствие растворения полостями в карстующихся породах, теоретически способными достигать сколь угодно большого размера. Отсюда появляется возможность выделения таких территорий, где образование карстово-суффозионных провалов полностью исключено, и таких, где они не могут превышать определенных размеров.

Как уже было показано, в условиях, представленных на рис. 34, *а*, в случае, когда $H_0 > 0$ и, особенно, когда $H_0 > H_1$, возможно образование карстово-суффозионных провалов, связанное с ползучим разжижением песчаных пород (см. рис. 21, *а*). При этом отметка напора трещинно-карстовых вод не обязательно должна превышать отметку уровня вод надкарстовых (на рис. 34, *а* эта ситуация не показана). В подобной гидрогеологической обстановке максимально возможный диаметр провала (d_{max}) будет определяться формулой

$$d_{max} = 2a_{max} = 2H_0/\mathrm{tg}\alpha_B, \qquad (37)$$

которая выводится простым преобразованием формулы (33).

Фильтрационное разрушение водонасыщенных песков восходящим потоком (ползучее разжижение) приводит к провалообразованию только в том случае, если

$$2a_{max} \geqslant 2a_{min} \geqslant 0{,}19(M_a + H_1 - H_0), \qquad (38)$$

что вытекает из условия, выраженного формулой (7). При $H_0 \leqslant 0$ образование провала, связанное с ползучим разжижением, полностью исключается.

В случае, когда отметка напора трещинно-карстовых вод расположена ниже отметки уровня надкарстовых вод, карстово-суффозионные провалы в тех же условиях (рис. 34, *а*) формируются также в связи с фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком, как это показано на рис. 21, *б*. В результате преобразования формулы (31) получаем выражение, служащее для расчета максимально возможного диаметра провала

$$d_{max} = 2a_{max} = \frac{2H_1[(H_1 - H_0)\gamma_w + 2M_a\gamma_A\mathrm{tg}^2(45^\circ - \varphi_н/2)]}{\left[2H_1\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{e_н + 1}\right) + 3M_a\gamma_A\right]\mathrm{tg}\varphi_н}. \qquad (39)$$

Такой провал может образоваться только при условии

$$2a_{max} \geqslant 2a_{min} \geqslant 0{,}38M_a, \qquad (40)$$

которое вытекает из формулы (11). В противном случае обрушение песков зоны аэрации не выходит на земную поверхность. При $H_0 \geqslant H_1$ карстово-суффозионный провал не может формироваться за счет фильтрационного разрушения водонасыщенных песков в нисходящем потоке.

Если надкарстовый водоносный горизонт перекрыт промежуточным водоупором и имеет слабонапорный характер, а отметка напора надкарстовых вод превышает отметку напора вод трещинно-карстовых (рис. 34, *б*), в формировании карстово-суффозионных провалов помимо фильтрационного разрушения водонасыщенных песков нисходящим потоком принимает участие и процесс совместного обрушения глинистых пород промежуточного водоупора и вышележащих песчаных пород, которые могут быть и водонасыщенными (см. рис. 21, *в*). Диаметр такого провала не превысит величину, определяемую формулой

$$d_{max} = 2a_{max} = \frac{2M_н\left\{(H_1 - H_0)\gamma_w + 2[M_у\gamma_у + M_п\gamma_п - (H_1 - M_н)\gamma_w]\,\mathrm{tg}^2(45^\circ - \varphi_н/2)\right\}}{\left\{2M_н\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{l_н + 1}\right) + 3[M_у\gamma_у + M_п\gamma_п - (H_1 - M_н)\gamma_w]\right\}\mathrm{tg}\varphi_н}, \qquad (41)$$

вывод которой основан на простом преобразовании формулы (32).

Из формулы (18) вытекает, что карстово-суффозионный провал в данных условиях может сформироваться только, если

$$2a_{max} \geqslant 2a_{min} \geqslant 2{,}86\sqrt{\frac{M^2_у C_у}{M_у\gamma_у + M_п\gamma_п - (H_1 - M_н)\gamma_w}}. \qquad (42)$$

Для практики промышленного и гражданского строительства региональные прогнозы провальной карстово-суффозионной опасности представляют интерес в первую очередь как инженерно-геологическое обоснование различного рода архитектурно-планировочных решений, целью которых является привязка будущих зданий и сооружений к площадям, наиболее безопасным с точки зрения возможного разрушительного воздействия опасных геологических процессов. Отсюда следует вывод, что результаты регионального инженерно-геологического прогноза карстово-суффозионного провалообразования целесообразно представлять в виде прогнозной карты, макет которой показан на рис. 35. Для построения такой карты необходимо в соответствии с формулами (37), (39) и (41) произвести расчет максимально возможных диаметров карстово-суффозионных провалов d_{max}, которые могут образоваться в местах расположения разведочных скважин, пробуренных в ходе инженерно-геологических изысканий (каждой скважине соответствует определенная точка на прогнозной карте). Расчет осуществляется по параметрам, полученным в ходе бурения и после лабораторного определения физических и физико-механических свойств покрывающих пород по отобранным из скважин образцам. Для тех же точек по формулам (38), (40) и (42) рассчитываются критические пролеты ослабленного пространства $2a_{min}$, над которым происходит обрушение покрывающих пород, сопровождающееся провалообразованием. В условиях, исключающих формирование провалов, величина $2a_{min}$ должна превышать величину $2a_{max}$.

Для удобства построения прогнозной карты местоположение разведоч-

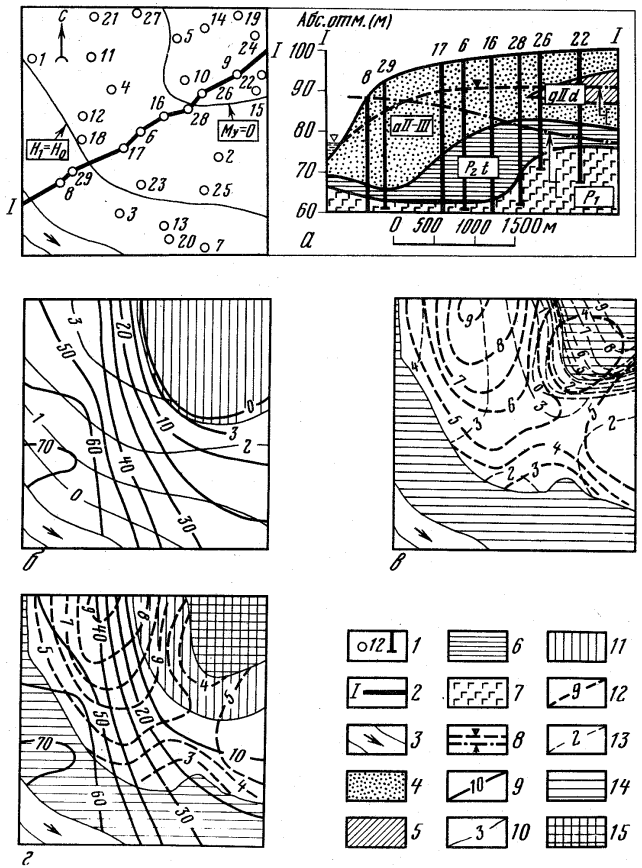


Рис. 35. Макет прогнозной карты карстово-суффозионного провалообразования

а – карта фактического материала и геологический разрез по линии I–I; *б* – вспомогательная карта условий карстово-суффозионного провалообразования, вызванного ползучим разжижением водонасыщенных песков; *в* – вспомогательная карта условий карстово-суффозионного провалообразования, вызванного фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком; *г* – окончательная прогнозная карта.

1 – разведочная скважина и ее номер; *2* – линия геологического разреза; *3* – река; *4* – аллювиальные средне- и верхнечетвертичные пески; *5* – моренные среднечетвертичные суглинки; *6* – верхнепермские мергелистые глины; *7* – нижнепермские гипсы и ангидриты; *8* – уровни и напоры подземных вод; *9* – изолиния максимально возможного диаметра карстово-суффозионного провала, формирующегося в результате ползучего разжижения водонасыщенных песков; *10* – изолиния критического пролета верхней части последней полости разжижения; *11* – территория, на которой исключается провалообразование, вызванное ползучим разжижением водонасыщенных песков; *12* – изолиния максимально возможного диаметра карстово-суффозионного провала, формирующегося в результате фильтрационного разрушения водонасыщенных песков нисходящим потоком; *13* – изолиния критического пролета верхней части зоны фильтрационного разрушения; *14* – территория, на которой исключается провалообразование, вызванное фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком; *15* – территория, на которой исключается карстово-суффозионное провалообразование

ных скважин (расчетных точек) наносится на вспомогательную карту фактического материала (рис. 35, *а*), а результаты расчетов помещаются в специальную таблицу (табл. 7). В дальнейшем еще на две вспомогательные карты наносятся изолинии величин d_{max} и $2a_{min}$, рассчитанных для провалов, образующихся в результате фильтрационного разрушения водонасыщенных песков в восходящем (рис. 35, *б*) и нисходящем (рис. 35, *в*) потоках. Такие изолинии проще всего отстраивать путем ручной графической интерполяции, но это не исключает применения других методов, например тренд-анализа. На каждой из вспомогательных карт через точки пересечения изолиний, в которых величины d_{max} и $2a_{min}$ имеют равные значения, проводятся границы территорий, в пределах которых невозможно образование карстово-суффозионных провалов данного генетического типа. После этого обе вспомогательные карты объединяются в одну (рис. 35, *г*), которая и представляет собой окончательную прогнозную карту карстово-суффозионного провалообразования.

На предлагаемой прогнозной карте выделяются территории четырех типов: I – образование карстово-суффозионных провалов, связанное с фильтрационным разрушением водонасыщенных песков восходящим потоком (ползучим разжижением) исключено; II – подобное провалообразование возможно; III – образование провалов, вызванное фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком, исключено и IV – подобное провалообразование допустимо. Территории второго и четвертого типов покрыты на карте изолиниями величины d_{max}, поэтому, если необходимо, они могут дифференцироваться далее по принципу выделения участков, на которых возможно образование карстово-суффозионных провалов с максимальными диаметрами, меняющимися в определенных диапазонах. Так, например, на прогнозной карте могут быть выделены участки, где допустимо формирование провалов, вызванное фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком, с максимально возможными диаметрами менее 5 м, от 5 до 10 м, более 10 м. Такие диапазоны выбираются произвольно, в зависимости от целей прогноза. Они могут, например, соответствовать существующим морфометрическим классификациям поверхностных карстопроявлений (Liszkowski, 1967) или же при их выборе можно руководствоваться интересами проектирования фундаментов зданий и сооружений (Методические рекомендации..., 1977). В последнем случае количественная региональная оценка провальной карстово-суффозионной опасности способна служить инженерно-геологическим обоснованием рационального выбора мер конструктивной противокарстовой защиты.

Нетрудно видеть, что разработанный автором принцип построения прогнозных карт карстово-суффозионного провалообразования позволяет прогнозировать параметры провалов не только природного, но и природно-техногенного и даже чисто техногенного происхождения. Кроме того, предлагаемые расчетно-теоретические решения применимы для количественной оценки не только существующей, но и ожидаемой провальной карстово-суффозионной опасности. Это связано с тем, что прогнозные формулы включают в себя весьма мобильные параметры (H_0, H_1, γ_a, $\gamma_п$), способные резко изменяться в результате различного рода хозяйственной деятельности, влияющей на подземную гидросферу (откачка подземных вод и восста-

Таблица 7. Расчетные параметры карстово-суффозионного провалообразования (к макету прогнозной карты)

№ скважины	Параметры провалообразования, вызываемого ползучим разжижением водонасыщенных песков		Параметры провалообразования, вызываемого фильтрационным разрушением водонасыщенных песков нисходящим потоком		Примечания
	Максимально возможный диаметр провала d_{max}, м	Критическая ширина (пролет) верхней части последней полости разжижения $2a_{min}$, м	Максимально возможный диаметр провала d_{max}, м	Критическая ширина (пролет) верхней части зоны фильтрационного разрушения $2a_{min}$, м	
1	2	3	4	5	6
1	52,5	2,1	4,3	4,2	–
2	9,0	2,0	5,0	1,8	–
3	55,7	0,1	–	–	Фильтрационное разрушение в нисходящем потоке исключается ($H_0 > H_1$)
4	38,4	2,9	7,5	3,1	–
5	–	–	4,2	0,5	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
6	22,4	2,4	5,6	2,8	–
7	26,6	0,2	–	–	Фильтрационное разрушение в нисходящем потоке исключается ($H_0 > H_1$)
8	68,8	0,1	–	–	То же
9	–	–	3,7	7,3	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
10	–	–	3,7	2,4	То же
11	45,4	3,1	8,4	3,6	”
12	61,4	2,0	5,3	3,3	”
13	35,8	0,5	–	–	Фильтрационное разрушение в нисходящем потоке исключается ($H_0 > H_1$)
14	–	–	3,5	6,2	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)

Таблица 7 (окончание)

1	2	3	4	5	6
15	–	–	5,2	1,5	То же
16	6,1	2,9	5,6	2,9	”
17	37,4	2,1	5,7	2,6	”
18	66,6	1,7	4,4	3,1	”
19	–	–	4,7	9,5	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
20	37,4	0,2	–	–	Фильтрационное разрушение в нисходящем потоке исключается ($H_0 > H_1$)
21	41,6	3,3	9,1	3,6	–
22	–	–	5,1	5,5	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
23	37,8	1,1	3,1	1,9	–
24	–	–	4,0	9,8	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
25	17,3	1,3	2,1	2,3	–
26	–	–	3,9	1,9	Покрывающая толща содержит промежуточный водоупор. Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
27	2,9	3,8	8,9	3,0	–
28	–	–	5,6	3,1	Ползучее разжижение исключается ($H_0 < 0$)
29	71,0	0,9	–	–	Фильтрационное разрушение в нисходящем потоке исключается ($H_0 > H_1$)

новление их сработанного уровня, искусственный подпор, техногенное поступление воды в покрывающие породы и т.п.). Для того чтобы перейти к оценке потенциальной карстово-суффозионной опасности, достаточно включить в прогнозные формулы ожидаемые величины уровней и напоров. Можно также отстроить прогнозные карты на самый неблагоприятный экстремальный случай, когда напор трещинно-карстовых вод упадет ниже отметки кровли подстилающего водоупора, и выделить при этом, если это возможно, территории, на которых образование карстово-суффозионных провалов исключается в любом случае, если не произойдет повышение уровня или напора надкарстовых вод. В общем, здесь могут применяться различные решения в зависимости от поставленных задач.

ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ

Локальные инженерно-геологические прогнозы характеризуют условия площадок, отведенных для строительства отдельных сооружений или групп сооружений (Бондарик, 1972; Розовский, Зелинский, 1975). Предлагаемый способ локального количественного прогнозирования провальной карстово-суффозионной опасности основан на анализе и математической обработке стандартных данных, получаемых в ходе инженерно-геологических изысканий под отдельные строительные объекты. Этот способ одновременно относится к расчетно-теоретическим и вероятностно-статистическим методам инженерно-геологического прогнозирования. С его помощью определяется максимально возможный диаметр ожидаемого провала и наиболее вероятное место его образования.

Максимально возможный диаметр карстово-суффозионного провала определяется с помощью тех же прогнозных формул, которые положены в основу региональных прогнозов провальной карстово-суффозионной опасности. Если в пределах площадки трещинно-карстовые воды обладают пьезометрическим напором, отметка которого превышает отметку кровли подстилающего водоупора, диаметр провала в любом случае рассчитывается по формуле (37), а возможность провалообразования оценивается в соответствии с формулой (38). В тех случаях, когда отметка пьезометрического напора трещинно-карстовых вод расположена ниже отметки уровня (напора) вод надкарстовых, максимально возможный диаметр карстово-суффозионного провала определяется согласно формуле (39) при отсутствии промежуточного водоупора и согласно формуле (41) при его наличии. Возможность карстово-суффозионного провалообразования оценивается в этой ситуации по формулам (40) и (42).

Если в пределах площадки пробурено несколько разведочных скважин и рассчитанные по ним прогнозные параметры карстово-суффозионного провалообразования заметно различаются между собой, прогнозная оценка дается, исходя из наименее благоприятных условий. При расчетах следует также учитывать возможные изменения гидродинамического режима подземных вод, связанные с предстоящим хозяйственным освоением данной территории. С этой целью в прогнозные формулы следует включать ожидаемые величины уровней и напоров.

Принцип выявления наиболее вероятного места образования карстово-суффозионного провала лучше всего продемонстрировать на конкретном примере, для чего целесообразно вернуться к результатам статического зондирования на участке двух карстово-суффозионных провалов 1969 г. в Москве (см. рис. 28). Анализ этих результатов показал наличие в восточной части площадки еще одного центра разуплотнения песков зоны аэрации, вблизи которого наблюдается закономерное изменение характера кривых зондирования, аналогичное изменению, представленному на рис. 29. Для определения местоположения этого неизвестного центра было выведено уравнение тренда второй степени, характеризующее изменение показателя статического зондирования крупных и средней крупности песков по условным прямоугольным координатам X и Y, расположенным в горизонтальной плоскости, и по глубине:

$$q_3 = -274 + 327X - 39{,}4Y - 14{,}1Z + 2{,}14XY - 13{,}7X^2 + 3{,}14Y^2 + 0{,}415Z^2, \quad (43)$$

где Z – абсолютная отметка данной точки минус 130 м.

Поскольку полученное уравнение описывает семейство поверхностей, имеющих общую вертикальную ось симметрии, то координаты этой оси (X = 12 м; Y = 2 м) будут координатами искомого центра. Относительно этого центра были выведены уравнения тренда для песков двух типов, аналогичные уравнениям (34) и (35).

Выявленные подобным образом закономерности пространственного распределения показателя статического зондирования, по-видимому, свидетельствуют о том, что в обнаруженнном центре разуплотнения либо некогда уже образовался провал, подобный провалам 1969 г., либо на глубине присутствует полость обрушения, еще не проявившаяся на поверхности в виде провала. Это предположение дополнительно подтверждается рядом косвенных данных, связанных с наличием во всех существующих на данной площадке центрах разуплотнения некоторых аномальных явлений. Ниже приводится их краткое перечисление.

1. В ходе бурения разведочных скважин автором были отобраны образцы водонасыщенных песков для оценки их суффозионной устойчивости. Эта оценка производилась на приборе конструкции В.Н. Славянова и в соответствии с его методикой (Славянов, 1971). Кроме того, до и после опытов определялся гранулометрический состав песков. Среднечетвертичные флювиогляциальные водонасыщенные пески представлены на участке двумя слоями: верхний, более мощный слой состоит из мелких (иногда пылеватых) песков, нижний, имеющий вдвое меньшую мощность, – из песков средней крупности и крупных (реже гравелистых). Особенности гранулометрического состава песков обоих типов позволяют, согласно В.Н. Кондратьеву (1958), отнести их к суффозионным разновидностям. Это подтвердилось и в ходе лабораторных опытов, причем сравнение результатов определения гранулометрического состава песков до и после эксперимента показало, что роль заполнителя в обоих случаях играет фракция размером менее 0,01 мм. Анализ пространственного распределения содержания этой фракции (Хоменко, 1982) и величины критического градиента возникновения суффозии (Хоменко, 1976) показали, что в песках, примыкающих к зоне провалов 1969 г., содержание заполнителя резко уменьшилось, вплоть до того, что значительная масса песков нижнего слоя стала несуффозионной. Точно такая же закономерность наблюдается и в зоне выявленного центра разуплотнения. Очевидно, это связано с интенсивным суффозионным выносом мелких частиц сквозь поры скелета водонасыщенных песков на ранних стадиях их фильтрационного разрушения нисходящим потоком.

2. В западной части площадки было обнаружено крупное (диаметром около 40 м) оседание кровли юрских глин, служащих подстилающим водоупором. К этому оседанию приурочены провалы 1969 г., однако на востоке, вблизи выявленного центра разуплотнения песков зоны аэрации, также отмечается некоторое снижение абсолютных отметок кровли и подошвы юрских глин. Судя по всему, это свидетельствует о прогибе подстилающего водоупора над крупной карстовой полостью, который мог сопровождаться образованием сквозных нарушений его сплошности в виде трещин.

3. И в зоне существующих провалов, и вблизи выявленного центра разуплотнения отмечается снижение уровня грунтовых надкарстовых вод в виде локальных депрессий. Несомненно, это следствие перетока грунтовых вод в лежащий ниже водоносный горизонт.

4. В западной и восточной частях площадки, вблизи обоих центров разуплотнения песков зоны аэрации наблюдается понижение отметок земной поверхности. Можно предположить, что подобным образом проявили себя подземные полости обрушения, как это, например, происходит при проходке горных выработок (Панюков, 1978). Такого рода явления отчетливо наблюдаются на лабораторных физических моделях (Бастраков, 1972; Давыдько, 1977).

Все эти факты свидетельствуют о развитии в обнаруженном центре, помимо разуплотнения песков зоны аэрации, других процессов—компонентов карстово-суффозионного провалообразования.

Таким образом, в ходе инженерно-геологических изысканий на отдельных площадках места наиболее вероятного провалообразования можно выявлять путем анализа данных статического или динамического зондирования. Для решения поставленной прогнозной задачи никаких принципиальных различий между двумя видами зондирования, как источниками информации о разуплотнении песков зоны аэрации, не существует.

Центры разуплотнения могут выявляться тремя способами:

а) сопоставлением (взаимным наложением) графиков зондирования (рис. 29 и 32): за искомый центр принимается местоположение той точки зондирования, график которой занимает крайнее левое положение;

б) выявлением критических значений показателей зондирования на территориях, где интервалы этих значений были установлены ранее относительно существующих провальных зон с помощью тренд-анализа (рис. 30 и 33): за центр разуплотнения принимается местоположение той точки, в которой кривая зондирования в максимальной степени ложится в область критических значений;

в) путем нахождения местоположения центра разуплотнения по уравнению тренда показателя зондирования, выведенному в условных координатах (см. рис. 28).

Последний способ отличается определенной сложностью, но позволяет получить наиболее точный результат.

Обнаруженные центры разуплотнения следует считать местами повышенной опасности с точки зрения потенциальной возможности карстово-суффозионного провалообразования. При этом не имеет принципиального значения, выявлен ли подобным образом старый засыпанный провал или удалось косвенно обнаружить промежуточный внутренний вывал, так как первый случай не менее опасен, чем второй, в связи с возможностью "оживления" существующей провальной воронки.

Достоверность локальных прогнозов, направленных на выявление мест возможного провалообразования, резко возрастает, если в обнаруженных центрах разуплотнения и вблизи них дополнительно отмечаются: уменьшение процентного содержания тонких фракций в водонасыщенных песках и повышение их суффозионной устойчивости; понижение отметок кровли и подошвы водоупора, отделяющего надкарстовые воды от трещинно-карстовых; снижение уровня грунтовых надкарстовых вод; понижение отметок земной поверхности. При совпадении всех перечисленных факторов в одной точке вероятность образования в ней карстово-суффозионного провала чрезвычайно высока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая книга имеет целью упорядочить разрозненные представления о природе и механизме определенного круга опасных для строительства процессов и явлений, которые могут быть объединены термином "карстово-суффозионные процессы", и предложить специалистам, сталкивающимся с этими явлениями, способы их количественного прогнозирования. Эта задача лежит в рамках главной современной проблемы инженерной геодинамики, сформулированной академиком Е.М. Сергеевым (1979), – разработки количественных прогнозов экзогенных и эндогенных геологических и инженерно-геологических процессов. Автор предпринял первую попытку создать общую теорию карстово-суффозионных процессов и разработать расчетно-теоретические методы количественной оценки провальной карстово-суффозионной опасности.

При этом автор полностью отдает себе отчет в том, что предложенные им прогнозные формулы в значительной мере идеализированы и не отражают всего многообразия существующих природных условий и возможных техногенных воздействий на геологическую среду. Однако в сравнительно простой инженерно-геологической обстановке, в условиях относительной однородности среды протекания рассматриваемых процессов такие прогнозные решения вполне способны найти удовлетворительное применение.

В предлагаемой работе не были решены, да и не могли быть решенными все проблемы, возникающие в ходе формального описания таких сложных по своей структуре многокомпонентных систем, как карстово-суффозионные процессы. В ней, в частности, не рассматривается влияние на диаметр провала статических нагрузок от зданий и сооружений и дальнейшее развитие свежей провальной формы, приводящее к образованию воронки. Тем не менее применение лабораторного эксперимента в качестве мощного инструмента познания процессов и явлений, скрытых от прямого наблюдения, позволило довольно резко продвинуться вперед на пути понимания механизма карстово-суффозионных процессов, а такое понимание в конечном счете обеспечивает принятие правильных инженерных решений в достаточно сложных ситуациях.

По мнению автора книги, ближайшие перспективы дальнейшего усовершенствования методики количественного прогноза карстово-суффозионных процессов лежат на пути создания новых оригинальных экспериментальных установок, совершенствования методики проведения экспериментов и повышения их точности, разработки более совершенных детерминированных и более корректных статистических математических моделей. При этом отнюдь не исключается применение других прогнозных методов, например базирующихся на сравнительно-геологическом анализе.

ЛИТЕРАТУРА

Альбов С.В. Объяснение происхождения провалов и просадок поверхности теорией горного давления (на материале карста низовьев левобережья реки Оки). – В кн.: Карстоведение: (Тр. Перм. карстовой конф., 1947). Пермь, 1948, вып. 4, с. 23–36.

Архидьяконских Ю.В. Опыт моделирования суффозионных воронок и возможность использования их при изучении карстовых колодцев и шахт. – В кн.: Пещеры. Пермь, 1971, вып. 10–11, с. 145–149.

Бастраков Г.В. Опыт моделирования деформаций обрушения и оседания песчаных толщ над подземными полостями. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 2/ЦИНИС, 1972, вып. 4 (16), с. 38–40.

Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М.: Недра, 1971. 272 с.

Бондарик Г.К. Классификация инженерно-геологических прогнозов и перспективы развития методов прогнозирования. – Тр. ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии, 1972, вып. 57, с. 5–18.

Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.

Бочков Н.М. Механическая суффозия грунта. М.: ОНТИ, 1936. 46 с.

Васильев Б.В. К динамике образования карстовых провалов на территории Татарской республики. – Докл. АН СССР. Н. С., 1953, т. 91, № 2, с. 367–369.

Газизов М.С. О влиянии распределения напряжений в массиве горных пород на развитие и проявление глубинного карста. – Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна в карстовых районах, М., 1968, вып. 8, с. 21–29.

Гвоздецкий Н.А. Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 392 с.

Геологический словарь: В 2-х т. 2-е изд., испр. М.: Недра, 1978.

Глуховский Е.А. Взаимодействие юрских и верхнекаменноугольных глин с подземными водами. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф.информ. Сер. 15/ЦИНИС, 1978, вып. 2 (67), с. 7–11.

Гольштейн М.Н. Внезапное разжижение песка. – В кн.: Вопросы геотехники: Сб. 1 Днепропетр. ин-та инженеров ж.-д. трансп. М.: Госстройиздат, 1953, с. 5–41.

Горшков С.П. Экзодинамические процессы освоенных территорий. М.: Недра, 1982. 286 с.

Давыдько Р.Б. Моделирование устойчивости конкретной карстовой полости методом эквивалентных материалов. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 2/ЦИНИС, 1975, вып. 3 (73), с. 34–37.

Давыдько Р.Б. Предварительные результаты изучения на моделях сдвижений пород над карстовыми полостями и возможность нахождения подземных пустот геодезическим методом. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. информ. Сер. 15/ЦИНИС, 1977, вып. 6 (59), с. 25–27.

Давыдько Р.Б., Толмачев В.В. Моделирование деформаций рыхлых толщ пород над карстовыми полостями. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. информ. Сер. 15/ЦИНИС, 1977а, вып. 6 (59), с. 28–33.

Давыдько Р.Б., Толмачев В.В. О моделировании механизма карстовых провалов. – Тр. ПНИИИС, 1977б, вып. 47, с. 123–133.

Даниленко В.П. Русская терминология: Опыт лингвистического описания. М.: Наука, 1977. 246 с.

Девдариани А.С. Моделирование выноса поверхностных отложений в карстовые полости. – В кн.: Материалы междуведомственной комиссии по изучению геологии и географии карста: Информ. сб. № 1. М., 1960, с. 114–126.

Дискуссия о механизме оползней. – Пробл. геомеханики, 1976, № 7, с. 150–159.

Дублянский В.Н. Основные задачи инженерной спелеологии. – Инж. геология, 1980, № 1, с. 3–13.

Дыховичный Ю.А., Максименко В.А. Проектирование и строительство на территориях, подверженных карстово-суффозионным процессам в Москве. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1979, № 3, с. 20–23.

Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов: (Гидрогеологическое моделирование.) Киев: Вища шк., 1976. 192 с.

Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с.

Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 260 с.

Инженерная геология СССР: В 8-ми т. М.: Изд-во МГУ, 1978. Т. 1. Русская платформа. 528 с.

Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. М.: Госстройиздат, 1957. 295 с.

Истомина В.С., Буренкова В.В., Мишурова Г.В. Фильтрационная прочность глинистых грунтов. М.: Стройиздат, 1975. 220 с.

Кавеев М.С. Карстово-суффозионные явления в левобережной части долины Волги в пределах Татарской АССР. – Изв. ВГО, 1956, т. 88, вып.5, с. 460–466.

Кожевникова В.Н. Особенности механизма образования просадок и провалов в результате изменений гидрогеологических условий закарстованных территорий. – В кн.: Прогноз изменения гидрогеологических условий застраиваемых территорий. М.: Стройиздат, 1980, с. 116–132.

Кожевникова В.Н. Методика оценки устойчивости закарстованных территорий. – Инж. геология, 1984, № 2, с. 26–40.

Кондратьев В.Н. Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах. Симферополь: Крымиздат, 1958. 76 с.

Копосов Е.В., Тычина О.В. Изучение фаз развития и учет возраста провальных воронок при инженерно-геологическом районировании закарстованных территорий. – Инж. геология, 1983, № 5, с. 67–74.

Короткевич Г.В. О карстово-суффозионных формах и мерах предупреждения их развития при строительстве. – В кн.: Грунтоведение и инженерная геология. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964, с. 155–160.

Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Недра, 1978. 263 с.

Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 397 с.

Кригер Н.И. Лёссовый псевдокарст. – Тр. ПНИИИС, 1973, вып. 32, с. 25–49.

Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И. и др. Моделирование проявлений горного давления. Л.: Недра, 1968. 279 с.

Кутепов В.М. Формирование напряженного состояния массивов горных пород на закарстованных территориях. – Инж. геология, 1983, № 1, с. 67–81.

Лисичкин В.А. Теория и практика прогностики: Методологические аспекты. М.: Наука, 1972. 224 с.

Логинов В.П. Устройство и экономическая эффективность бесфильтровых скважин. – В кн.: Мелиорация земель в низовьях Терека и Сулака. М.: Колос, 1977, с. 46–56.

Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.

Лукин В.С. Провальные явления на Урале и в Предуралье. – Тр. Ин-та геологии. Урал. фил. АН СССР: Гидрогеол. сб. № 3. Свердловск, 1964, вып. 69, с. 133–160.

Лыкошин А.Г. Вопросы изучения фильтрационных деформаций и неоднородности водопроводимости горных пород. – Тр. Всесоюз. проект.-изыскат. и НИИ "Гидропроект", 1976, сб. 48, с. 61–72.

Максимович Г.А. Основы карстоведения. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1963. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. 444 с.

Мартин В.И., Травкин А.И. Моделирование карстовых провалов и прогноз устойчивости закарстованных территорий для строительства. – В кн.: Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: (Тез. докл. науч.-техн. семинара 29–30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979, с. 18–20.

Медведев О.П., Ильинская Н.М. Один из принципов инженерно-геологического районирования карстоопасной территории. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 15/ЦИНИС, 1979, вып. 5, с. 8–10.

Меликян А.А. Зависимость между высотой свода равновесия и шириной выработки: Науч. сообщ. № 5. Тбилиси: Груз. политехн. ин-т, 1960. 29 с.

Методические рекомендации по проектированию фундаментов зданий и сооружений в карстовых районах. Киев: НИИ строит. конструкций, 1977. 71 с.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. М.: Недра, 1974. 296 с.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.

Молоков Л.А. Основные черты процесса вымыва заполнителя карстовых полостей. – Изв. вузов. Геология и разведка, 1969, № 2, с. 107–110.

Муравски Г. Толковый словарь немецких геологических терминов: Пер. с нем. М.: Мир, 1980. 376 с.

Насонов Л.Н. Механика горных пород и крепление горных выработок. М.: Недра, 1969. 330 с.

Огоноченко В.П. Расчет диаметра опасной карстовой полости. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 15/ЦИНИС, 1979, вып. 5, с. 18–19.

Павлов А.П. О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод. – Землеведение, 1898, т. V, кн. 3/4, с. 91–147.

Панюков П.Н. Инженерная геология. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1978. 296 с.

Парфенов С.И. Карстово-суффозионные явления на Ходынском поднятии в г. Москве. – В кн.: Новые методы изучения инженерно-геологических ус-

ловий: (Материалы науч. заседаний секции инж. геологии за 1977–1978 гг.). М.: Наука, 1981, с. 34–38.

Патрашев А.Н. Напорное движение грунтового потока, сопровождающееся выносом мелких частиц грунта. – Изв. НИИ гидротехники, Л., 1938, т. 22, с. 5–49.

Печеркин А.И., Закоптелов В.Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1982, 88 с.

Платов Н.А. Природа структурных связей песчаных несцементированных пород. М.: Наука, 1982. 96 с.

Плотников И.И., Дубейковский С.Г. Условия возникновения и прогнозирование провальных явлений при осушении месторождений бокситов в карстовых массивах. – В кн.: Междунар. геол. конгр. XXV сес. Докл. сов. геологов. Геология четвертич. периода ... М.: Наука, 1976, с. 217–224.

Протодьяконов М.М. Попытка опытного исследования законов давления пород на горные выработки. – Горн. журн. 1912, № 4/5, с. 12–39.

Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. М.: Наука, 1970. 76 с.

Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. М.: Недра, 1973. 216 с.

Рейтер Ф., Кленгель К., Пашек Я. Инженерная геология: Пер. с нем. М.: Недра, 1983. 528 с.

Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М.: Стройиздат, 1967. 90 с.

Розовский Л.Б., Зелинский И.П. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса: Изд-во Одес. ун-та, 1975. 115 с.

Саваренский А.П. Влияние взвешивающего гидродинамического давления на образование карстово-суффозионных провалов (на примере р-на г. Дзержинска). – В кн.: Тез. докл. к совещ. по обобщению опыта науч. исслед., изысканий, проектирования, стр-ва и эксплуатации сооружений в районах распространения карста. Горький, 1965, с. 125–126.

Саваренский И.А., Миронов Н.А. Закономерности развития и количественная оценка карста в районе г. Благовещенска Башк.АССР. – Тр. Произв. и НИИ по инж. изысканиям в стр-ве, 1978, вып. 56, с. 55–74.

Сергеев Е.М. Инженерная геология – наука о геологической среде. – Инж. геология, 1979, № 1, с. 3–19.

Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1983. 392 с.

Славянов В.Н. Инженерная геология: Методические указания по лабораторным исследованиям свойств пород на опытных установках и приборах ВЗПИ. М., 1971. 42 с.

Славянов В.Н. Количественный прогноз и моделирование процессов суффозии. – В кн.: Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: (Тез. докл. науч.-техн. семинара, 29–30 нояб. 1979 г.). Пермь, 1979, с. 13–15.

Словарь технических терминов по механике грунтов и фундаментостроению на английском, русском, французском, шведском, португальском и испанском языках. М.: Физматгиз, 1958. 140 с.

Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.

Справочник по инженерной геологии. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1981. 325 с.

Справочное руководство гидрогеолога: В 2-х т., 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1979.

Ступишин А.В. Суффозионный карст и его распространение в Среднем Поволжье. – В кн.: Экзогенные процессы в Среднем Поволжье. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1972, с. 21–31.

Терминологический словарь по инженерной геологии. Ч. 1. Терминология, 1973. 403 с.

Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике: Пер. с англ. М.: Госстройиздат, 1958. 607 с.

Толковый словарь английских геологических терминов: Пер. с англ. М.: Мир. Т. 1. 1977; Т. 2. 1978; Т. 3. 1979.

Толмачев В.В. Условия строительства промышленных объектов на закарстованных территориях. – Пром. стр-во, 1974, № 8, с. 34–36.

Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий. – Инж. геология, 1980, № 3, с. 98–107.

Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П. и др. Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами. – Инж. геология, 1982, № 4, с. 46–59.

Троицкий Г.М., Григорук П.Д., Хоменко В.П. Моделирование на ЭВМ и расчет размеров карстовых провалов и воронок. – В кн.: Строительство на закарстованных территориях: (Тез. докл. Всесоюз. совещ. Подольск, 22–23 нояб. 1983 г.). М., 1983, с. 72–74.

Фадеев П.И. Методические рекомендации по изучению и использованию гранулометрии песчаных пород в инженерно-геологических целях. М.: Изд-во МГУ, 1974. 112 с.

Флорин В.А. Критерий возникновения явлений разжижения водонасыщенных песков. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1961, № 6, с. 11–12.

Хоменко В.П. Суффозионные свойства водонасыщенных песков вблизи зоны карстово-суффозионных провалов. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 2/ЦИНИС, 1976, вып. 11 (52), с. 15–22.

Хоменко В.П. Опыт прогноза развития подземной суффозии. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. информ. Сер. 15/ЦИНИС, 1978, вып. 2 (67), с. 3–7.

Хоменко В.П. Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов. А.с. 851201 СССР. Заявл. 03.10.79, № 2825013/18–25. – Б.И., 1981, № 28, МКИ *G* 01 *N* 15/08.

Хоменко В.П. К вопросу о механизме суффозионного процесса в несвязных грунтах. – В кн.: Комплексная оценка свойств грунтов и инженерно-геологические процессы. М.: Стройиздат, 1982, с. 136–151.

Цытович Н.А. Механика грунтов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1951. 528 с.

Чемлева Т.А., Микешина Н.Г. Применение симплекс-решетчатого планирования при исследовании диаграмм состав–свойство. – В кн.: Новые идеи в планировании эксперимента. М.: Наука, 1969, с. 191–208.

Черняк Э.Р. Определение сцепления песков методом разрыва. – Инженерные изыскания в строительстве: Реф. сб. Сер. 2/ЦИНИС, 1976, вып. 6 (47), с. 29–34.

Четырехъязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 703 с.

Шенк Х. Теория инженерного эксперимента: Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 381 с.

Berger H. Zur Problematik des Bruchverhaltens im Gebirge über zu Erdfällen führenden Hohlräumen oder Lockerzonen. – Abh. Dt. Akad. Wiss. Berlin. Kl. Bergbau, Hüttenw. und Montangeol., 1968, N 2, S. 92–193.

Dearman W.R., Strachan A., Roche D.P., Vincett C. Influence of mining subsidence on pipelines. – Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol., 1982, N 25, p. 19–24.

Definition of terms related to liquefaction. – J. Geotechn. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1978, vol. 104, N 9, p. 1197–1200.

Foose R.M. Ground-water behavior in the Hershey Valley, Pennsylvania. – Bull. Geol. Soc. Amer., 1953, vol. 64, p. 623–645.

Jennings J.E. Building on dolomites in the Transvaal. – Civ. Eng. S. Afr., 1966, vol. 8, N 2, p. 41–62.

Kälin M. Hydraulik piping – theoretical and experimental findings. – Canad. Geotechn. J., 1977, vol. 14, N 1, p. 107–124.

Kammerer F. Ingenieurgeologische Methoden in Erdfall- und Senkungsgebieten. – Freiberg. Forschungsh. C, 1962, H. 127, S. 51–109.

Ladd R.S. Specimen preparation and cyclic stability of sands. – J. Geotechn. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1977, vol. 103, N 6, p. 535–547.

Lewandowski A., Sobieraj J. Zjawiska mechaniczne wystepujące w gruntach sypkich pod wpływem filtracji wody. – Gosp. wodna, 1971, r. 31, N 5, s. 181–184.

Liszkowski J. Podstawy klasyfikacji zjawisk i procesów krasowych dla potrzeb praktyki inżynierskо-geologicznej i hydrogeologicznej. – Przegl. geol., 1967, r. 15, N 5, s. 225–230.

Nogushi T., Takahashi R., Tokumitsu Y. Small sinking holes in limestone area with special reference to drainage of coal mines. – In: Land subsidence: Proc. Tokyo symp., 1969. P., 1970, vol. 2, p. 467–474.

Penzel M. Bemerkungen zur Erdfallgenese in Auslaugungsgebieten aus geomechanischer Sicht. – Neue Bergbautechn., 1980, Bd. 10, N 1, S. 15–19.

Report of the IAEG Comission on site investigations. – Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol., 1981, N 24, p. 185–226.

Rosenblad J.L. Development of a rocklike model material. – In: Basic and Appl. Rock Mech.: Proc. 10th Symp. Rock Mech., Austin, Tex., May 20–22, 1968. N.Y., 1972, p. 331–361.

Sherard J.L., Dunnigan L.P., Decker R.S., Steele E.F. Pinhole test for identifying dispersive soils. – J. Geotechn. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1976, vol. 102, N 1, p. 69–85.

Stimpson B. Modelling materials for engineering rock mechanics. – Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci., 1970, vol. 7., N 1, p. 77–121.

Wilk Z., Motyka J., Niewdana J. Geologiczne i hydrogeologiczne uwarunkowania powstania zapadlisk na obszarze górniczym jednej z kopalń rud cynkowo-ołowiowych. – Biul. Inst. geol., 1973, t. 3, N 277, s. 359–373.

Ziems J. Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers. 1. Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffvervormungen durch Wirkungen Sickerwassers. – Wasserwirt.-Wassertechn., 1967, Bd. 17, N 2, S. 50–55.

ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$( )_а$ – параметры зоны аэрации и свойства слагающих ее пород;
M – мощность;
$( )_н$ – параметры зоны насыщения (надкарстовый водоносный горизонт) и свойства слагающих ее пород;
$( )_п$ – параметры толщи, перекрывающей промежуточный водоупор, и свойства слагающих ее пород;
$( )_у$ – параметры промежуточного водоупора и свойства слагающих его пород;
a – полуширина (полупролет) верхней части ослабленного пространства, над которым происходит обрушение вышележащих пород;
a_0 – полуширина сквозного нарушения сплошности подстилающего водоупора;
C – удельное сцепление;
D – гидродинамическое давление;
$D_{гр}$ – гидродинамическое давление в верхней точке границы фильтрационного разрушения водонасыщенных песков в нисходящем потоке;
d – диаметр провала (при наличии цифрового индекса – характерный диаметр песчаных частиц);
e – коэффициент пористости;
f – крутизна параболического свода обрушения (отношение полуширины основания свода к его высоте);
$f_{кр}$ – коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову;
H – пьезометрический напор подземных вод;
H_0 – пьезометрический напор трещинно-карстовых вод за вычетом мощности подстилающего водоупора;
H_1 – суммарная величина мощности надкарстового водоносного горизонта и пьезометрического напора надкарстовых вод;
$( )_M$ – параметры модели;
$( )_{max}$ – максимально возможная величина параметра;
$( )_{min}$ – минимально возможная (критическая) величина параметра;
$( )_N$ – параметры натуры;
$p_д$ – условное динамическое сопротивление пород при ударном зондировании;
$q_з$ – удельное сопротивление пород конусу зонда при статическом зондировании;
R – расстояние в горизонтальной плоскости от некоторой точки до центра ближайшего провала;
$R_р$ – сопротивление разрыву;
$\alpha_в$ – угол естественного откоса водонасыщенного песка;
γ – удельный вес;
γ' – фактическая величина удельного веса с учетом трения о стенки экспериментальной установки;
$\gamma_{пр}$ – приведенный удельный вес по В.Д. Слесареву;
γ_s – удельный вес песчаных частиц, приблизительно равный $2{,}66 \cdot 10^4$ Н/м^3;
γ_w – удельный вес воды, приблизительно равный 10^4 Н/м^3;
ρ – плотность;
φ – угол внутреннего трения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

Карстово-суффозионные процессы и их основные компоненты 4

Общая характеристика карстово-суффозионных процессов и условий их протекания 12
Обзор существующих представлений о карстово-суффозионных процессах 12
Систематизация существующих представлений о карстово-суффозионных процессах 16
Объективные возможности прогнозирования карстово-суффозионных процессов 22

Лабораторные физические модели карстово-суффозионных процессов 25
Методика моделирования 25
Конструкция экспериментальных установок 26
Технология эксперимента 29
Материалы моделей 32
Условия проведения опытов 35
Результаты моделирования 38

Механизм карстово-суффозионного провалообразования 51
Формирование сквозных нарушений в подстилающем водоупоре 51
Формирование карстово-суффозионных провалов 53

Детерминированные математические модели карстово-суффозионных процессов 56
Некоторые общие положения 56
Модель подземного обрушения песчаных пород 58
Модель разрушения промежуточных водоупоров под действием гравитационных и гидростатических сил 64
Модель фильтрационного разрушения водонасыщенных песков в нисходящем потоке 68
Модель фильтрационного разрушения песчаных пород в восходящем потоке 73

Статистические математические модели карстово-суффозионного провалообразования 74
Некоторые общие положения 74
Пространственная изменчивость показателей статического и динамического зондирования в условиях карстово-суффозионного провалообразования 76

Прогноз карстово-суффозионного провалообразования 80
Региональный прогноз 80
Локальный прогноз 88

Заключение 91

Литература 92

Основные буквенные обозначения 96