ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов



Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Общие положения 5
2. Основные принципы лабораторного физического моделирования карстовых процессов 6
Моделирование процессов растворения карстующихся пород 6
Моделирование карстово-обвальных процессов 10
Моделирование карстово-суффозионных процессов 12
3. Экспериментальное оборудование 12
Оборудование для лабораторного изучения скорости растворения карстующихся пород 13
Оборудование для моделирования карстово-обвальных процессов методом эквивалентных материалов 15
Оборудование для лоткового моделирования карстово-суффозионных процессов 17
4. Методика лабораторного физического моделирования карстовых процессов 19
Методика лабораторного химико-кинетического моделирования процессов растворения карстующихся пород 20
Методика моделирования карстово-обвальных процессов на эквивалентных материалах 22
Методика моделирования карстово-суффозионных процессов на установке системы В.П.Хоменко 29
Приложение 1. Основные буквенные обозначения 33
Приложение 2. Журнал исходных данных для моделирования процессов растворения карстующихся пород 34
Приложение 3. Журнал результатов наблюдений за ходом растворения карстующихся пород 35
Приложение 4. Пример оценки скорости роста карстовой полости по результатам химико-кинетического моделирования процессов растворения карстующихся пород 36
Приложение 5. Журнал результатов пробных определений свойств эквивалентного материала 38
Приложение 6. Журнал исходных данных для моделирования карстово-обвальных процессов 39
Приложение 7. Журнал результатов наблюдений за ходом карстово-обвальных процессов 40
Приложение 8. Пример определения начального диаметра карстово-обвального провала по результатам моделирования на эквивалентных материалах 40
Приложение 9. Журнал результатов определения коэффициента фильтрации материала модели 43
Приложение 10. Журнал исходных данных для моделирования карстово-суффозионных процессов 44
Приложение 11. Журнал результатов наблюдений за ходом карстово-суффозионных процессов 45
Приложение 12. Пример определения величины критического снижения пьезометрического напора трещинно-карстовых вод по результатам моделирования на установке системы В.П.Хоменко 46

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
(ПНИИИС) ГОССТРОЯ СССР

Рекомендации

по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов

Москва Стройиздат 1984

УДК 624.131.37:551.442

Рекомендованы к изданию инженерно-геологической секцией Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов / ПНИИИС Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – 48 с.

Рассмотрены основные принципы, методика и технология лабораторного физического моделирования карстовых процессов. Дано описание конструкций экспериментальных установок и приемов работы с ними, рассмотрены природные условия, которые могут воспроизводиться с их помощью, указаны основные критерии подобия, которые должны соблюдаться при моделировании. Приведены примеры решения некоторых задач, связанных с оценкой карстоопасности на основе лабораторного физического моделирования карстовых процессов.

Для инженерно-технических работников проектных, изыскательских и научно-исследовательских организаций.

Рис. 14, табл. 11.

Р $\frac{3202000000-359}{047(01)-84}$ Инструкт.-нормат., 1 вып. –63–84

©Стройиздат, 1984

ВВЕДЕНИЕ

Карстовые процессы широко распространены в СССР. Наибольшую опасность для промышленного, гражданского и транспортного строительства представляют собой различные поверхностные и подземные карстопроявления и, в первую очередь, провалы. Это вызывает необходимость дальнейшего совершенствования противокарстовых защитных мероприятий, которые не могут осуществляться без надлежащего инженерно-геологического обоснования.

Инженерно-геологическое обоснование противокарстовой защиты базируется на материалах, получаемых в процессе инженерных изысканий в карстовых районах, и включает в себя, в первую очередь, оценку устойчивости закарстованных территорий и отдельных площадок. В определенных условиях такая оценка может быть получена только на основе физического моделирования карстовых процессов. В ряде случаев даже при возможности использования других способов оценки карстоопасности они уступают по качеству результата методу физического моделирования.

Кроме определенных достоинств, присущих методу моделирования с точки зрения точности прогноза и возможностей адекватного воспроизводства натуры, этот метод незаменим при изучении механизма карстовых процессов, как правило, скрытых от прямого наблюдения.

Максимальное соответствие модели геологического процесса его реальному прототипу достигается в ходе натурного эксперимента. Однако в силу сложности и недостаточной разработанности методики экспериментального воспроизведения карстовых процессов в натуре в настоящее время более доступным является применение лабораторного эксперимента в качестве одного из методов оценки карстоопасности. Лабораторное физическое моделирование карстовых процессов (за исключением дорогостоящего центробежного моделирования) может успешно применяться в изыскательских организациях, о чем свидетельствует положительный опыт треста ЗапУралТИСИЗ Госстроя РСФСР.

Предлагаемые Рекомендации составлены на основе многолетнего опыта экспериментального лабораторного изучения карстовых процессов в ПНИИИС Госстроя СССР. При моделировании карстово-обвальных и карстово-суффозионных процессов в

ПНИИИС использовались "плоские" экспериментальные установки, применение которых значительно упрощает проблему наблюдения и фиксации имитируемых деформаций. В настоящее время в Союздорнии Минтрансстроя в ходе научных исследований, посвященных изучению механизма карстово-обвальных процессов, успешно применяется установка объемного моделирования. Использование объемных моделей значительно повышает точность эксперимента и позволяет достигать большего соответствия натурным условиям.

Главная цель предлагаемых Рекомендаций заключается в повышении научно-технического уровня оценки карстоопасности при инженерно-геологических изысканиях на закарстованных территориях и, в конечном счете, в повышении надежности промышленного, гражданского и транспортного строительства в особо сложных природных условиях. Рекомендации содержат требования, вполне доступные для реализации силами и средствами изыскательских организаций и отдельных изыскательских подразделений, обладающих лабораторной базой.

Рекомендации составлены ПНИИИС Госстроя СССР (канд. геол.-минерал. наук В.П.Хоменко при участии канд.техн.наук В.В.Толмачева и геолога Р.Б.Давыдько).

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Рекомендации распространяются на инженерно-геологические изыскания для промышленного, гражданского и транспортного строительства в карстовых районах и являются первым опытом разработки руководящего методического документа по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов.

1.2. Лабораторное физическое моделирование карстовых процессов служит для оценки карстоопасности. Его рекомендуется применять:

при инженерных изысканиях для строительства особо ответственных сооружений в сочетании с другими методами оценки карстоопасности;

в сложной природной обстановке, затрудняющей применение расчетно-теоретических методов оценки карстоопасности (наличие сложной трещиноватости, многослойность грунтовой толщи, плохая изученность механизма карстовых процессов и т.п.);

в условиях, затрудняющих применение вероятностно-статистических методов оценки карстоопасности (отсутствие представительных данных для статистической обработки, необходимость оценки ожидаемой карстоопасности при ее отсутствии в настоящее время и т.д.).

Лабораторное физическое моделирование не следует применять в качестве метода оценки карстоопасности в особо сложной природной обстановке, когда соблюдение всех необходимых критериев подобия становится крайне затруднительным или невозможным.

1.3. Карстовые процессы, протекающие в условиях покрытого карста на равнинных территориях, разделяются на:

процессы, протекающие в карстующихся породах (химическое и механическое разрушение самих карстующихся пород или заполнителя полостей и трещин в карстующихся породах);

процессы, протекающие в некарстующихся покрывающих породах (гравитационное и гидродинамическое разрушение покрывающих пород).

1.4. В настоящих Рекомендациях излагаются принципы и методы лабораторного физического моделирования процессов:

растворения некарбонатных карстующихся пород;

гравитационного разрушения карстующихся и покрывающих пород (карстово-обвальных процессов);

гидродинамического и гравитационно-гидродинамического разрушения покрывающих пород (карстово-суффозионных процессов).

1.5. Методика планирования эксперимента, выявления и оценки экспериментальных ошибок и неопределенностей, анализа и интерпретации результатов моделирования в настоящих Рекомендациях не рассматривается.

1.6. Для удобства пользования настоящими Рекомендациями все условные буквенные обозначения, применяемые в формулах, расшифрованы в прил. 1.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЛАБОРАТОРНОГО ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Принципы и методы одновременного воспроизведения на одной модели процессов растворения карстующихся пород, карстово-обвальных и карстово-суффозионных процессов или любой пары перечисленных процессов разработаны недостаточно и настоящими Рекомендациями не рассматриваются.

2.2. Процессы растворения карстующихся пород следует воспроизводить путем химико-кинетического моделирования, карстово-обвальные процессы – путем моделирования на эквивалентных материалах, карстово-суффозионные – путем физического гидрогеологического (лоткового) моделирования.

2.3. Основные принципы химико-кинетического моделирования разработаны в физической химии, моделирования на эквивалентных материалах – в горном деле, лоткового моделирования – в практической гидрогеологии. В настоящих Рекомендациях рассматривается конкретное приложение этих принципов к моделированию карстовых процессов.

Моделирование процессов растворения карстующихся пород

2.4. С помощью лабораторного физического моделирования процессов растворения карстующихся пород осуществляются:

определение скорости растворения карстующихся пород в естественных условиях и под действием техногенных факторов, в том числе в основании зданий и сооружений;

оценка эффективности противокарстовых мероприятий, направленных на изменение гидрогеохимического режима подземных вод;

определение длины пути насыщения подземных вод;

оценка скорости расширения трещин и полостей.

2.5. Карстующиеся породы по механизму их растворения подземными водами разделяются на диффузионно растворимые и недиффузионно растворимые. К диффузионно растворимым породам относятся сульфатные (ангидриты, гипсы), хлоридные (каменные соли) и некоторые другие. К недиффузионно растворимым – карбонатные породы (доломиты, известняки, мелы).

2.6. Методика лабораторного моделирования растворения недиффузионно растворимых пород для инженерно-геологических целей разработана недостаточно и в настоящих Рекомендациях не рассматривается.

2.7. Процесс диффузионного растворения определяется следующим условием:

$$r = K S_P (C_н - C_0). \qquad (1)$$

2.8. В условиях движения растворителя в щели скорость ее расширения ρ в сечении, расположенном на расстоянии x от входного отверстия, определяется формулой:

$$\rho_x = 2K(C_н - C_x)/\gamma_P. \qquad (2)$$

2.9. Отличительными признаками диффузионного растворения являются зависимость скорости растворения от скорости и направления движения растворителя и незначительная зависимость растворимости от давления и температуры растворителя. Растворимость диффузионно растворимого вещества зависит от его химического состава и от химического состава растворителя. Она определяется экспериментально или путем расчетов (Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М., ПНИИИС Госстроя СССР, 1967).

2.10. Коэффициент скорости растворения зависит от химического состава и структуры растворяемого вещества, скорости движения растворителя и пространственной ориентации поверхности растворения. Значение коэффициента скорости растворения, как правило, следует определять экспериментально, используя следующие критерии подобия:

критерий Маргулиса

$$M = K_N / V_N = K_M / V_M, \qquad (3)$$

критерий Рейнольдса

$$Re = V_N l_N / \nu_N = V_M l_M / \nu_M, \qquad (4)$$

критерий Фурье

$$F = D_N t_N / l_N^2 = D_M t_M / l_M^2, \quad (5)$$

критерий гомохронности

$$Ho = t_N V_N / l_N = t_M V_M / l_M, \quad (6)$$

критерий Пекле

$$Pe = V_N l_N / D_N = V_M l_M / D_M, \quad (7)$$

критерий Прандтля

$$Pr = \nu_N / D_N = \nu_M / D_M. \quad (8)$$

В ходе химико-кинетического моделирования, с помощью которого в лабораторных условиях воспроизводятся процессы растворения карстующихся пород подземными водами, в зависимости от условий моделирования должны определяться отношения между критериями подобия, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Условия моделирования		Зависимости между критериями подобия	
Растворяемое вещество	Растворитель		
Специально подобранный эквивалентный материал ($D_M > D_N$)	Специально подобранный растворитель ($\nu_M \neq \nu_N$)	$M = A\,(F)^e\,(Ho)^f\,(Re)^g$	(9)
То же	Вода с температурой, близкой к температуре подземных вод ($\nu_M \approx \nu_N$)	$M = A\,(Pe)^g$	(10)
Вещество одного состава с карстующейся породой, но иной структуры ($D_M \approx D_N$)	Вода с температурой, отличающейся от температуры подземных вод ($\nu_M \neq \nu_N$)	$M = A\,(Pr)^f\,(Re)^g$	(11)
Карстующаяся порода натуры ($D_M = D_N$)	Вода с температурой, близкой к температуре подземных вод ($\nu_M \approx \nu_N$)	$M = A\,(Re)^g$	(12)

Примечание. Формулы (9) – (12) справедливы только при ламинарном движении воды. Содержащиеся в формулах безразмерные эмпирические коэффициенты A, e, f, g определяются экспериментально.

2.11. При движении растворителя в щели все вышеперечисленные критерии, кроме критерия Прандтля, принимают следующий вид:

$$M = K_N d_N / q_N = K d_M / q_M, \quad (13)$$

$$Re = q_N / \nu_N = q_M / \nu_M, \quad (14)$$

$$F = D_N t_N / d_N^2 = D_M t_M / \alpha_M^2, \quad (15)$$

$$Ho = t_N q_N / d_N^2 = t_M q_M / d_M^2, \quad (16)$$

$$Pe = q_N / D_N = q_M / D_M. \quad (17)$$

2.12. Величины кинематической вязкости растворителя и коэффициента диффузии растворяемого вещества необходимо определять путем постановки специальных экспериментов. Допускается использование значений этих величин, приводимых в справочной литературе. Величины кинематической вязкости воды различной температуры и коэффициента диффузии гипса при растворении его в воде приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температура воды, °С	Кинематическая вязкость воды, 10^{-6} м^2/с	Коэффициент диффузии гипса, 10^{-10} м^2/с
7	1,45	3,5
10	1,30	3,8
20	1,01	5,0

2.13. Коэффициент скорости растворения K_M определяется в условиях моделирования по формуле

$$K_M = \Delta d \gamma_p / \Delta t (C_H - C_x). \quad (18)$$

Коэффициент скорости растворения в натурных условиях K_N находится по формуле

$$K_N = M q_N / d_N = M V_N. \quad (19)$$

Значение числа (критерия) Маргулиса определяется в ходе экспериментов.

2.14. Результаты химико-кинетического моделирования можно переносить на процессы, происходящие в натуре, при соблюдении:

начального геометрического подобия модели и натурного объекта;

одинаковой пространственной ориентации поверхностей растворения и направления движения потока растворителя в поле гравитационных сил на модели и в натуре;

критериев подобия, перечисленных в п. 2.10 настоящих Рекомендаций.

Моделирование карстово-обвальных процессов

2.15. С помощью лабораторного физического моделирования карстово-обвальных процессов осуществляются:

оценка степени опасности карстовых полостей в естественных условиях и под действием техногенных факторов, в том числе при расположении полостей непосредственно под зданиями и сооружениями;

оценка эффективности противокарстовых мероприятий, направленных на увеличение прочности пород и ликвидацию полостей;

прогнозирование размеров поверхностных и подземных карстопроявлений, вызванных гравитационными разрушениями.

2.16. Метод эквивалентных материалов, с помощью которого осуществляется моделирование карстово-обвальных процессов, основан на применении в качестве материалов модели некоторых веществ, физико-механические свойства которых находятся в определенных соотношениях с физико-механическими свойствами имитируемых пород. Для скальных пород эти соотношения (критерии подобия) имеют вид:

$$(R_p)_N \ \gamma_M \ L_M = (R_p)_M \ \gamma_N \ L_N ; \qquad (20)$$

$$(R_c)_N \ \gamma_M \ L_M = (R_c)_M \ \gamma_N \ L_N . \qquad (21)$$

Величина ускорения силы тяжести в правой и левой частях формул опущена.

В практических расчетах допустимо ограничиваться применением только одного критерия подобия, представленного формулой (21).

При моделировании гравитационных разрушений глинистых пород необходимо использовать критерии подобия, выражающиеся формулами:

$$c_N \ \gamma_M \ L_M = c_M \gamma_N \ L_N ; \qquad (22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_N = \operatorname{tg} \varphi_M . \qquad (23)$$

Песчаные породы воспроизводятся на моделях с соблюдением только одного критерия подобия, представленного формулой (23).

2.17. В том случае, когда на модели воспроизводится многослойная толщина горных пород, для всех слоев модели должно соблюдаться условие

$$\gamma_M / \gamma_N = \text{const}. \qquad (24)$$

2.18. При моделировании карстово-обвальных процессов на эквивалентных материалах, как правило, не учитывается фактор времени. В качестве приближенного расчета допускается перенос времени с модели на натуру t_N в соответствии с формулой

$$t_N \approx t_M \sqrt{l_N / l_M}. \qquad (25)$$

2.19. В случае когда размеры модели не позволяют воспроизводить в заданном масштабе всю толщу покрывающих пород, а размеры воспроизводимых разрушений не превышают размеров модели и сами разрушения не выходят на поверхность земли, допускается имитация вышележащей неработающей толщи пород эквивалентной искусственной пригрузкой. Величина пригрузки P должна подбираться по формуле

$$P = L B \sum_{i=1}^{n} (\gamma_M)_i \cdot (m_M)_i, \qquad (26)$$

где i – номер слоя пород, имитируемых с помощью пригрузки, начиная с первого от поверхности.

2.20. При выборе материалов, предназначенных для имитации горных пород определенного типа, необходимо придерживаться соответствия эквивалентных материалов воспроизводимым породам по характеру деформируемости. В частности, не следует имитировать глинистые породы твердой консистенции пластичными материалами, глинистые породы пластичной и текучей консистенций – несцементированными зернистыми или сцементированными хрупкими материалами и т.д., даже при формальном соблюдении подобия физико-механических свойств, согласно требованиям п. 2.16 настоящих Рекомендаций.

Отклонение от этого правила допускается только при мелких линейных масштабах моделирования, когда необходимо учитывать псевдопластические свойства пород, проявляющиеся в крупных массивах.

2.21. С помощью лабораторного физического моделирования карстово-суффозионных процессов осуществляются:

оценка степени опасности естественных и искусственных изменений гидродинамической обстановки на закарстованных территориях;

оценка эффективности противокарстовых мероприятий, направленных на изменение фильтрационно-гидродинамического режима подземных вод;

прогнозирование размеров поверхностных и подземных карстопроявлений, вызванных гидродинамическими и гравитационно-гидродинамическими разрушениями.

2.22. Метод физического гидрогеологического (лоткового) моделирования, с помощью которого осуществляется лабораторная имитация карстово-суффозионных процессов, основан на использовании специальных гидравлических установок (грунтовых лотков), заполняемых водопроницаемым зернистым материалом и воспроизводящих в уменьшенном масштабе область фильтрации подземных вод. При этом фильтрационно-гидродинамические параметры натуры и модели должны быть связаны между собой соотношением

$$\mu_M l_M t_N k_N = \mu_N l_N t_M k_M . \qquad (27)$$

Если в качестве материала модели используются породы натуры, а фильтрующийся жидкостью служит вода приблизительно той же температуры и химического состава, что и в натурных условиях, критерий подобия будет выражаться формулой

$$l_M t_N = l_N t_M . \qquad (28)$$

Если в задачи эксперимента не входит учет фактора времени, основным условием моделирования остается геометрическое подобие модели натурному объекту.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. Экспериментальное оборудование, предназначенное для проведения лабораторного физического моделирования, должно включать:

экспериментальную установку, в ходе работы которой непосредственно воспроизводится изучаемый процесс;

измерительные системы, служащие для контроля за ходом эксперимента и замера его необходимых параметров;

вспомогательное оборудование, предназначенное для подготовки материалов модели и их размещения в экспериментальной установке.

3.2. Экспериментальные установки, предназначенные для лабораторного физического моделирования карстовых процессов, могут иметь различную конструкцию в зависимости от характера решаемых задач и от особенностей природной обстановки, воспроизводимой на моделях. Экспериментальные установки, описание которых приводится в настоящих Рекомендациях, предназначены для решения широкого круга инженерно-геологических задач.

3.3. В настоящих Рекомендациях приводятся описания предельно упрощенных вариантов конструкций необходимых экспериментальных установок. Допускаются уточнения и дополнения конструкций рекомендуемых установок, направленные на повышение точности эксперимента и расширение возможностей данного вида моделирования.

3.4. В связи с недостаточной изученностью механизма карстово-обвальных и карстово-суффозионных процессов их лабораторное моделирование, как правило, следует осуществлять на "плоских" экспериментальных установках, которые дают возможность прямого наблюдения и фиксации общей картины протекания имитируемых карстовых разрушений. Объемные модели и соответствующие экспериментальные установки имеют ряд преимуществ перед "плоскими" в отношении более полного соответствия природным условиям. Однако практика "плоского" лабораторного физического моделирования показывает, что оно вполне приемлемо с точки зрения точности эксперимента при всестороннем учете возникающих в ходе опыта специфических погрешностей.

3.5. В настоящих Рекомендациях рассматриваются только простейшие измерительные системы и вспомогательное оборудование, отсутствие которых делает невозможным проведение эксперимента. Системы фиксации общей картины развития моделируемых процессов в настоящих Рекомендациях не рассматриваются.

Оборудование для лабораторного изучения скорости растворения карстующихся пород

3.6. Лабораторное физическое моделирование процессов растворения карстующихся пород рекомендуется проводить на экспериментальной установке, конструкция которой представлена на рис. 1. С помощью установки имитируется процесс растворения стенок вертикальных трещин и полостей при нисходящем

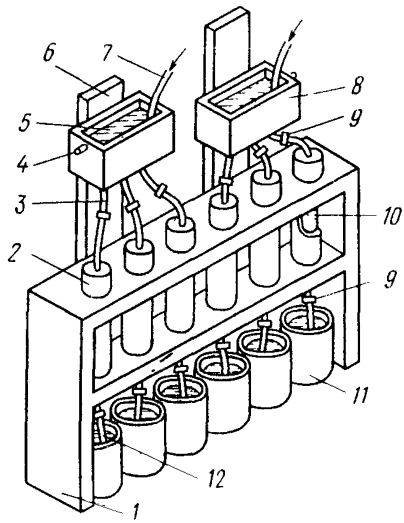


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения скорости растворения карстующихся пород (вид спереди с частичным вырезом стенки рабочего цилиндра)

1 – обойма; 2 – рабочий цилиндр; 3 – соединительный шланг; 4 – выпускной штуцер; 5 – растворитель; 6 – направляющая стойка; 7 – система подачи растворителя; 8 – напорный бак; 9 – регулируемый зажим; 10 – запарафинированный образец растворяемого вещества; 11 – приемный сосуд; 12 – выпускной шланг

движении подземных вод. При внесении назначительных конструктивных изменений установка может воспроизводить процессы растворения при иной пространственной ориентации трещин и направления подземного потока.

3.7. Установка состоит из обоймы с закрепленными в ней шестью рабочими цилиндрами, в которые помещаются образцы горных пород или эквивалентных растворяемых веществ. Каждый рабочий цилиндр снабжен набором металлических пластин различной длины и толщины, служащих для компоновки образцов. На вертикальных направляющих стойках закреплены два перемещаемых напорных бака, оснащенных системами подачи растворителя, выпускными штуцерами и соединительными резиновыми шлангами, посредством которых растворитель из напорных баков подается на образцы. Под каждым рабочим цилиндром расположен приемный сосуд, соединенный с рабочим цилиндром выпускным шлангом. Соединительные и выпускные шланги установки снабжены регулируемыми зажимами. Установка может иметь более шести рабочих цилиндров и более двух напорных баков.

3.8. В качестве измерительных приборов используются:

электрический солемер типа реохордного моста Р-38, предварительно тарированный по результатам химических анализов растворов разной концентрации и температуры, служащий для замера концентрации в воде растворенных солей;

штангенциркуль и щелемер для измерения ширины щели, а также линейка для измерения размеров образцов;

лабораторный термометр для замера температуры растворителя;

мерные шкалы на приемных сосудах для определения объема вытекающего растворителя;

часы для замера времени.

3.9. В качестве вспомогательного оборудования используются камнерезный и камнешлифовальный станки для подготовки образцов твердых горных пород;

набор ручных режущих инструментов для подготовки образцов легко обрабатываемых горных пород или эквивалентных материалов;

формы для отливки образцов из эквивалентных материалов;

весы для определения плотности растворяемого вещества.

Оборудование для моделирования карстово-обвальных процессов методом эквивалентных материалов

3.10. Лабораторное физическое моделирование карстово-обвальных процессов рекомендуется проводить на экспериментальной установке (стенде), конструкция которой представлена на рис. 2. На стенде имитируются гравитационные разрушения пород над незакольматированной карстовой полостью при безнапорном характере трещино-карстовых вод и отсутствии постоянных водонасосных горизонтов в покрывающих породах.

3.11. Стенд представляет собой жесткую прямоугольную раму, состоящую из днища и торцевых стенок, на которой закреплены съемная передняя и разборная задняя стенки. Передняя стенка стенда изготовлена из прозрачного материала и может быть усилена съемными ребрами жесткости. Задняя стенка состоит из отдельных съемных досок, причем вторая сверху доска имеет в середине сквозное окно, через которое в материал модели вставляется стальная индикаторная пластина. Задняя стенка стенда усилена съемным диагональным ребром жесткости, на котором закреплен поворотный кронштейн для установки индикатора. Внутренние поверхности передней, задней, торцевых стенок и днища образуют рабочую камеру, заполняемую эквивалентными материалами. Заполненная рабочая камера, если это необходимо, может быть перекрыта сверху горизонтальной доской с равномерно распределенным грузом (пригрузкой).

При необходимости стенд может быть дополнительно оснащен устройством, имитирующим горизонтальный рост карстовой полости. В этом случае нижняя съемная доска заменяется бо-

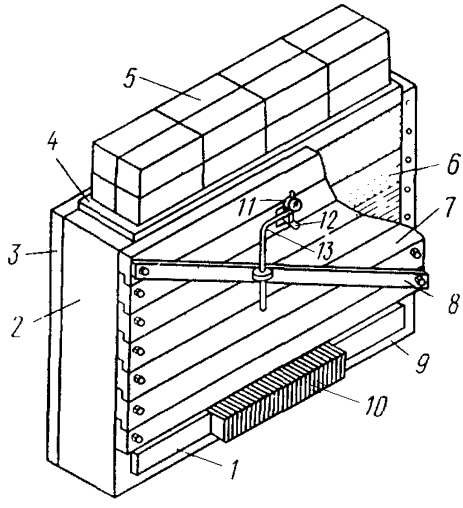


Рис. 2. Стенд для моделирования карстово-обвальных процессов (вид сзади с частичным вырезом задней стенки)

1 – боковая опорная доска; 2 – торцевая стенка; 3 – передняя стенка; 4 – доска для размещения пригрузки; 5 – пригрузка; 6 – рабочая камера, заполненная материалами модели; 7 – съемная доска задней стенки; 8 – ребро жесткости; 9 – днище; 10 – опорные бруски; 11 – индикатор часового типа; 12 – индикаторная пластина; 13 – поворотный кронштейн

лее узкой, а на днище стенда укладываются две боковые опорные доски и (между ними) ряд выступающих опорных брусков одинаковой толщины (не более 0,5 см). Перечисленные дополнительные элементы конструкции стенда показаны на рис. 2.

3.12. Рама стенда и ребра жесткости должны, как правило, изготовляться соответственно из швеллерной и уголковой стали, а задняя стенка – из пропитанных олифой шпунтовых досок.

3.13. Рабочая камера стенда должна иметь длину не менее 2 м. Ширина рабочей камеры должна составлять не менее 1/8 ее высоты.

3.14. В качестве измерительных приборов используются:

линейка для контрольных замеров ширины имитируемой полости, толщины слоев эквивалентных материалов и т.п.;

индикатор часового типа для замера деформаций модели;

часы для замера времени.

3.15. В качестве вспомогательного оборудования используются:

режущие кольца и лабораторные весы для определения плотности эквивалентных материалов;

гидравлический пресс для определения сопротивления сжатию эквивалентных материалов, имитирующих скальные породы;

сдвиговой прибор для определения прочностных характеристик эквивалентных материалов, имитирующих глинистые и песчаные породы;

бытовые весы, емкости для замеса и другие приспособления, служащие для подготовки крупных порций эквивалентных материалов;

устройства для разогрева зернистых компонентов и цементирующих веществ;

ковши, трамбовки, скользящая опалубка и другие приспособления, служащие для загрузки и разгрузки рабочей камеры стенда;

режущие инструменты, служащие для имитации роста карстовой полости.

Оборудование для лоткового моделирования карстово-суффозионных процессов

3.16. Лабораторное физическое моделирование карстово-суффозионных процессов рекомендуется проводить на экспериментальной фильтрационной установке системы В.П.Хоменко (авторское свидетельство СССР № 851201, кл. G 01 N 15/08, 1981), конструкция которой представлена на рис. 3. Установка позволяет имитировать гидродинамические и гравитационно-гидродинамические разрушения покрывающих некарстующихся пород:

при отсутствии в покрывающих породах постоянных водоносных горизонтов;

в условиях единого водоносного горизонта в покрывающих и карстующихся породах;

при наличии водоносного горизонта в покрывающих породах, отделенного от водоносного горизонта в карстующихся породах водоупором со сквозными нарушениями сплошности.

3.17. Фильтрационная установка представляет собой прямоугольный грунтовый лоток. Она имеет прозрачную переднюю, а также заднюю и боковые стенки, дно, две водоупорные и две опорные перемычки, вставные перфорированные перегородки, закрепленные в вертикальных пазах передней и задней стенок. Над дном установки смонтирована специальная водоупорная система, состоящая из двух выдвижных опорных пластин с рукоятками, на которые опираются две выдвижные водоупорные пластины, также снабженные рукоятками, и расположенная в центре утяжеленная вставка. В комплекте установки имеется целый набор таких вставок различной толщины с шагом 2 мм. Водоупорная система в целом закреплена в горизонтальных пазах передней и задней стенок, а выдвижные опорные и водоупорные пластины имеют свободный выход через сквозные окна в боковых стенках.

Средние части передней и задней стенок, водоупорная система и перфорированные перегородки образуют рабочую камеру, заполняемую материалом модели. Крайние левые и правые части передней и задней стенок, верхние части боковых стенок, водоупорные перемычки и перфорированные перегородки об-

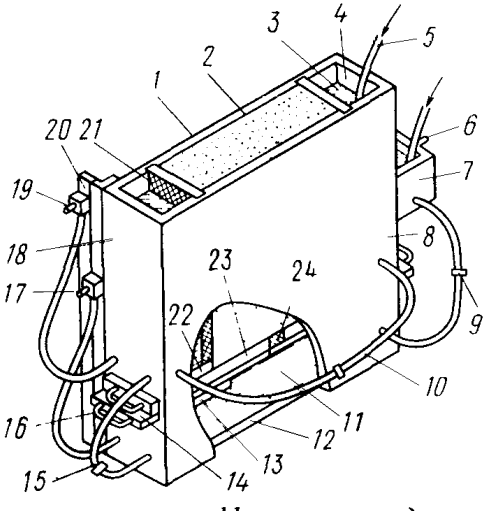


Рис. 3. Фильтрационная установка системы В.П.Хоменко (вид сзади с частичным вырезом задней стенки)

1 – передняя стенка; 2 – рабочая камера, заполненная материалами модели; 3 – фильтрующаяся жидкость; 4 – боковая водоприемная камера; 5 – система подачи фильтрующейся жидкости; 6 – выпускной штуцер напорного бака; 7 – напорный бак; 8 – задняя стенка; 9 – глухой зажим; 10 – соединительный шланг боковых водоприемных камер; 11 – нижняя водоприемная камера; 12 – дно; 13 – опорная перемычка; 14 – опорная пластина; 15 – соединительный шланг правой боковой и нижней водоприемных камер; 16 – рукоятка; 17 – выпускной штуцер нижней водоприемной камеры; 18 – боковая стенка; 19 – выпускной штуцер правой боковой водоприемной камеры; 20 – направляющие; 21 – перфорированная перегородка; 22 – водоупорная перемычка; 23 – водоупорная пластина; 24 – утяжеленная вставка

разуют две боковые водоприемные камеры, заполняемые фильтрующейся жидкостью и связанные между собой резиновым шлангом. Правая боковая водоприемная камера соединяется резиновыми шлангами с выпускным штуцером и с нижней водоприемной камерой, образованной нижними частями передней, задней и боковых стенок, водоупорными перемычками, водоупорной системой и дном. Нижняя водоприемная камера заполняется фильтрующейся жидкостью и соединяется резиновыми шлангами со вторым выпускным штуцером и напорным баком, установленным на левой боковой стенке. Оба выпускных штуцера и напорный бак свободно перемещаются и фиксируются на вертикальных направляющих. Левая боковая водоприемная камера и напорный бак оснащены системами подачи фильтрующейся жидкости. Напорный бак имеет отдельный выпускной штуцер. Все соединительные шланги установки снабжены глухими зажимами.

3.18. Рабочая камера фильтрационной установки должна иметь длину не менее 1 м. Ширина рабочей камеры должна составлять не менее 1/8 ее высоты. Желательно, чтобы длина рабочей камеры не менее чем в 2 раза превышала ее высоту.

3.19. В качестве измерительных приборов используются:

мерный сосуд для определения расхода фильтрующейся жидкости;

штангенциркуль и щелемер для контрольных замеров ширины сквозного нарушения в водоупорной системе;

мерные шкалы на боковых стенках и направляющих, служащие для установки и контроля необходимых уровней и напоров фильтрующейся жидкости;

часы для замера времени.

3.20. В качестве вспомогательного оборудования используются:

режущие кольца и лабораторные весы для определения плотности материалов модели;

лабораторная муфельная печь для высушивания образцов материалов модели, отобранных с целью определения их естественной влажности;

ковши, трамбовки и другие приспособления, служащие для загрузки и разгрузки рабочей камеры фильтрационной установки.

4. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

4.1. Методика лабораторного физического моделирования карстовых процессов определяется применяемым способом моделирования, особенностями воспроизводимой на модели природной обстановки и спецификой экспериментального оборудования. В настоящих Рекомендациях излагается методика лабораторного физического моделирования карстовых процессов, осуществляемого на рекомендуемых экспериментальных установках (см. рис. 1–3).

4.2. В настоящих Рекомендациях излагается методика: подбора и подготовки материалов модели; подготовки экспериментальных установок к работе; проведения эксперимента, включая необходимые измерения и контроль за его ходом.

4.3. В настоящих Рекомендациях не рассматривается методика работы со стандартными серийно выпускаемыми приборами и вспомогательным оборудованием;фото-, кино- и иной фиксации общей картины протекания моделируемых процессов.

4.4. Допускаются отклонения от изложенной в настоящих Рекомендациях методики моделирования, если они направлены на повышение точности эксперимента.

Методика лабораторного химико-кинетического моделирования процессов растворения карстующихся пород

4.5. Лабораторное моделирование на установке для узучения скорости растворения карстующихся пород (см. рис. 1) проводится с использованием горных пород натуры (например, гипса) или специально подобранного эквивалентного материала с высокой скоростью растворения (например, уплотненной соды). Каменная соль может применяться в качестве материала модели в обоих случаях.

Образцы, служащие материалами модели, должны иметь приблизительно одинаковый химический состав и плотность.

4.6. Образцы должны иметь цилиндрическую форму. Их размеры определяются размерами керна (в случае использования в качестве материалов модели горных пород натуры) и размерами рабочих цилиндров экспериментальной установки. Длина образца не должна превышать 1 м, так как превышение этого размера нежелательно с точки зрения сохранности образца при его механической обработке.

Образцы горных пород вырезаются из керна на камнерезном станке или, если это возможно, вручную. Образцы из эквивалентных материалов отливаются в специальных цилиндрических или полуцилиндрических формах. Размеры полученных таким образом образцов замеряются, а сами они взвешиваются для последующего расчета плотности растворяемого вещества.

4.7. Для подготовки цилиндрического образца к испытаниям его необходимо разрезать вдоль оси цилиндра на две половины и тщательно отшлифовать будущие поверхности растворения. Затем следует вставить между половинами образца по всей его длине две металлические пластины, имеющие толщину, равную необходимой для опыта начальной ширине щели, и обмотать образец проволокой, как это показано на рис. 4.

4.8. Подготовленный образец необходимо вставить в рабочий цилиндр экспериментальной установки и залить зазор между боковой поверхностью образца и внутренней поверхностью рабочего цилиндра расплавленным парафином. При этом следует избегать попадания парафина на будущие поверхности растворения через входное и выходное отверстия на торцевых поверхностях образца.

4.9. Количество образцов для испытаний определяется количеством рабочих цилиндров экспериментальной установки. В случае применения установки с шестью рабочими цилиндрами и двумя напорными баками необходимо подготовить три пары

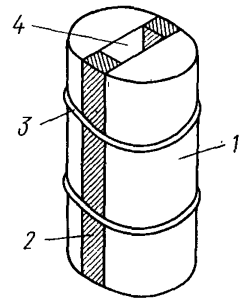


Рис. 4. Образец растворяемого вещества, подготовленный к испытаниям

1 – растворяемое вещество; 2 – металлическая пластина; 3 – проволока; 4 – щель

образцов разной длины так, чтобы в каждой из пар образцы имели примерно одинаковую длину.

4.10. Для подготовки экспериментальной установки к работе необходимо поместить рабочие цилиндры с образцами в обойму, присоединить к ним шланги, идущие от напорных баков, и выпускные шланги, причем все шланги должны быть наглухо перекрыты зажимами. Рабочие цилиндры должны быть установлены таким образом, чтобы первые три цилиндра с образцами разной длины соединялись с одним напорным баком, а вторые три – с другим.

Затем следует установить под каждым рабочим цилиндром приемный сосуд и вывести в него соответствующий выпускной шланг, после чего необходимо закрепить напорные баки на разной высоте. После заполнения напорных баков растворителем установку следует считать подготовленной к проведению эксперимента.

4.11. В качестве растворителя, как правило, должна использоваться водопроводная вода. При этом необходимо удостовериться в том, что за время опыта химический состав используемой воды практически не меняется, особенно в отношении содержания ионов натрия и хлора.

4.12. Перед началом опыта необходимо с помощью солемера определить начальную концентрацию растворяемой соли в используемой воде и концентрацию насыщения (растворимость) этой соли. Допускается расчетное определение растворимости согласно требованиям п. 2.9 настоящих Рекомендаций.

4.13. Все исходные характеристики образцов растворяемого вещества и растворителя, как замеренные непосредственно, так и определенные расчетным путем или принятые по справочным данным, заносятся в специальный журнал, форма которого приводится в прил. 2.

4.14. Для того чтобы начать эксперимент, необходимо открыть зажимы на соединительных и выпускных шлангах и тем самым обеспечить прохождение воды через рабочие цилиндры.

При этом следует производить периодические контрольные замеры расхода воды и путем регулировки зажимов на входе и выходе установить ее постоянный расход в течение всего опыта. Расход воды должен быть таким, чтобы число Рейнольдса не превышало 1300.

4.15. В ходе опыта с помощью лабораторного термометра определяется температура воды в приемном сосуде и фиксируются показания солемера. По тарировочным кривым устанавливается концентрация растворяемой соли в воде, выходящей из рабочих цилиндров.

4.16. После прохождения через рабочие цилиндры 0,1–1,0 м^3 воды (объем воды зависит от скорости растворения материала модели) опыт следует считать завершенным. Продолжительность опыта, как правило, составляет от нескольких часов до суток и также определяется скоростью растворения.

По окончании опыта рабочие цилиндры вынимаются из обоймы и разогреваются до плавления парафина. Из них следует извлечь образцы и замерить ширину щелей на входе и на выходе потока.

4.17. Параметры модели, замеренные в ходе опыта и по его окончании, заносятся в рабочий журнал, форма которого представлена в прил. 3. В журнал заносятся также результаты вычислений, необходимых для определения скорости растворения. Все вычисления делаются, как правило, по окончании опыта, за исключением расчета числа Рейнольдса, необходимого для контроля за ламинарностью потока, согласно требованиям п. 4.14 настоящих Рекомендаций.

В прил. 4 рассматривается конкретный пример оценки скорости растворения гипса на основе результатов химико-кинетического моделирования.

Методика моделирования карстово-обвальных процессов на эквивалентных материалах

4.18. При лабораторном физическом моделировании карстово-обвальных процессов горные породы, как правило, должны воспроизводиться на моделях с помощью различных зернистых эквивалентных материалов:

несвязные породы – с помощью несцементированных или слабоувлажненных (сцементированных водой) зернистых материалов;

пластичные глинистые породы – с помощью зернистых материалов, сцементированных нетвердеющими вяжущими;

скальные и твердые глинистые породы – с помощью зернистых материалов, сцементированных твердеющими вяжущими.

Допускается использование в качестве материалов моделей других веществ из числа применяемых при моделировании методом эквивалентных материалов.

4.19. В качестве зернистых компонентов эквивалентных материалов используются: песок, тальк, молотые слюды, сухие порошкообразные глины, опилки, мелкие стеклянные шарики и т.п. В качестве цементирующих (вяжущих) веществ применяются: гипс, негашеная известь, вещества типа парафинов, различные клеи, масла, вода и т.п.

4.20. Эквивалентные материалы должны подбираться таким образом, чтобы их свойства соответствовали основным критериям подобия с учетом выбранного масштаба согласно требованиям пп. 2.16 и 2.17 настоящих Рекомендаций. Подбор свойств эквивалентного материала может осуществляться только в том случае, если он состоит из нескольких компонентов.

4.21. Компонентом несцементированного зернистого материала следует считать одно из составляющих его зернистых веществ. Компонентом сцементированного зернистого материала следует считать одно из составляющих его зернистых веществ, смешанное с таким количеством вяжущего, которые обеспечивает соответствие характера материала модели характеру имитируемой горной породы согласно требованиям п. 2.20 настоящих Рекомендаций.

4.22. Для подбора необходимого соотношения зернистого и вяжущего веществ в составе компонента сцементированного эквивалентного материала следует изготовить несколько пробных смесей, постоянно увеличивая содержание вяжущего. Оптимальный состав смеси определяется по визуальным признакам.

4.23. Эквивалентный материал, выбранный в качестве материала модели, должен состоять из трех компонентов. Допускается применение двухкомпонентных эквивалентных материалов, однако в этом случае значительно затрудняется подбор их необходимых свойств.

4.24. Для подготовки эквивалентных материалов типа бетонов необходимо тщательно перемешать зернистые компоненты и сухое цементирующее вещество, залить их водой и снова перемешать. Через некоторое время следует ожидать охватывания смеси, после чего можно определять свойства материала. Иногда для этого требуется еще и длительное высушивание при комнатной температуре.

Для подготовки зернистых эквивалентных материалов, сцементированных вяжущими, твердеющими при охлаждении, необходимо тщательно перемешать зернистые компоненты, разогреть их до температуры не менее 100°С, залить их расплавленным

вяжущим и снова перемешать до получения однородной массы. После охлаждения до комнатной температуры смесь затвердевает, и материал становится готовым для определения его свойств.

Для подготовки зернистых эквивалентных материалов, сцементированных вяжущими, твердеющими при комнатной температуре (клеями), необходимо тщательно перемешать зернистые компоненты, залить их вяжущим и снова перемешать. Через некоторое время смесь затвердевает и можно определять ее свойства.

Для подготовки зернистых эквивалентных материалов, сцементированных нетвердеющими вяжущими, необходимо тщательно перемешать зернистые компоненты, залить их вяжущим и снова перемешать. Сразу по окончании перемешивания можно определять свойства полученного материала.

4.25. Определение физико-механических свойств эквивалентных материалов, как правило, должно осуществляться на тех же приборах и теми же методами, как оно осуществлялось для имитируемых горных пород.

4.26. Подбор свойств трехкомпонентного эквивалентного материала следует осуществлять по правилам симплекс-решетчатого планирования с построением графиков-треугольников зависимостей свойств материала от его состава. Для этого необходимо определить эмпирические зависимости свойств материала от содержания его компонентов, выражающиеся формулой:

$$\eta = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \beta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \beta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + a_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (29)$$

где a, β – эмпирические коэффициенты.

Для расчета коэффициентов в формуле (29) следует подготовить десять пробных смесей специально подобранного состава, как это показано на рис. 5. Результаты определения свойств этих смесей заносятся в журнал, форма которого приводится в прил. 5.

Расчет эмпирических коэффициентов осуществляется по формулам:

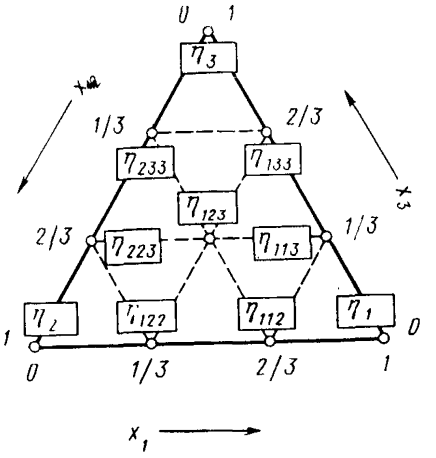
$$a_1 = \eta_i, \quad (30)$$

где i = 1,2 или 3;

$$\alpha_{12} = 2{,}25(\eta_{112} + \eta_{122} - \eta_1 - \eta_2); \quad (31)$$

$$\alpha_{13} = 2{,}25(\eta_{113} + \eta_{133} - \eta_1 - \eta_2); \quad (32)$$

Рис. 5. Необходимое расположение точек опробывания при подборе свойств трехкомпонентного эквивалентного материала



$$\alpha_{23} = 2{,}25\,(\eta_{223} + \eta_{233} - \eta_2 - \eta_3); \qquad (33)$$

$$\beta_{12} = 2{,}25(3\,\eta_{112} - 3\,\eta_{122} - \eta_1 + \eta_2); \qquad (34)$$

$$\beta_{13} = 2{,}25(3\,\eta_{113} - 3\,\eta_{133} - \eta_1 + \eta_3); \qquad (35)$$

$$\beta_{23} = 2{,}25(3\,\eta_{223} - 3\,\eta_{233} - \eta_2 + \eta_3); \qquad (36)$$

$$\alpha_{123} = 27\,\eta_{123} - 6{,}75\,(\eta_{112} + \eta_{122} + \eta_{113} + \eta_{133} + \eta_{223} + \eta_{233}) + 4{,}5\,(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3). \qquad (37)$$

4.27. Полученные зависимости изображаются в виде графиков-треугольников с изолиниями свойств материала (один график для одного свойства). Выбор необходимого состава материала модели должен осуществляться путем взаимного наложения таких графиков, исходя из условий моделирования.

4.28. Допускается произвольный выбор состава пробных смесей и последующее построение графиков-треугольников зависимостей свойств эквивалентных материалов от их состава путем ручной графической интерполяции. Однако при определенных обстоятельствах использование этих приемов может резко снизить точность подбора материалов модели.

4.29. Для того, чтобы начать укладку подобранных эквивалентных материалов в рабочую камеру стенда, необходимо разобрать его заднюю стенку. Если в задачи моделирования входит имитация карстующихся пород, а также детальное воспроизведение конфигурации развивающихся в них полостей и их роста

во всех направлениях, то материал, эквивалентный карстующимся породам, укладывается прямо на днище стенда.

Если же в задачи моделирования не входит имитация карстующихся пород, или на модели воспроизводится только горизонтальный рост карстовой полости, на днище стенда, по его краям следует поместить две боковые опорные доски, а между ними – ряд опорных брусков. После этого непосредственно на опорные доски и бруски укладывается нижний слой эквивалентного материала.

4.30. Укладка эквивалентных материалов типа бетонов, а также зернистых материалов, сцементированных твердеющими вяжущими, должна осуществляться до их схватывания или затвердения. В процессе укладки эквивалентный материал распределяется ровным слоем и уплотняется трамбовкой.

Для имитации горизонтальной трещиноватости материал необходимо укладывать отдельными слоями необходимой толщины, определяемой расстояниями между трещинами в данном линейном масштабе, причем поверхность каждого слоя перед укладкой следующего посыпается дробленой слюдой. Для имитации вертикальной трещиноватости следует использвовать прокладки из плотной бумаги или картона. При имитации карстующихся пород обязательно воспроизведение на модели центральной вертикальной трещины по всей мощности слоя соответствующего эквивалентного материала.

Укладка каждого вышележащего слоя эквивалентных материалов должна осуществляться только после полного схватывания, а иногда и длительной сушки нижележащего слоя, если он состоит из материала типа бетона. Если нижележащий слой состоит из зернистого материала, сцементированного твердеющими вяжущими, также следует дождаться его затвердения.

4.31. По мере укладки материалов модели должна производиться последовательная сборка задней стенки стенда, начиная с ее нижней доски. После установки и крепления второй сверху доски через сквозное окно следует ввести в материал модели индикаторную пластину. Эта операция должна производиться до схватывания или затвердения соответствующего слоя эквивалентных материалов. Сборка задней стенки завершается креплением съемного диагонального ребра жесткости и установкой на нем поворотного кронштейна для крепления индикатора.

4.32. По окончании сборки задней стенки стенда после полного схватывания или затвердения верхнего слоя эквивалентных материалов, его поверхность, если это необходимо, перекрывается горизонтальной доской, на которую равномерно укладывается пригрузка. Затем на свободном конце индикаторной

пластины необходимо установить индикатор часового типа и закрепить его на поворотном кронштейне.

Модель следует считать готовой к проведению опыта, после того, как произойдет полное уплотнение эквивалентных материалов под действием собственной массы и массы пригрузки, что должно быть зафиксировано с помощью индикатора.

4.33. Если на модели воспроизводится слой карстующихся пород и рост в них полости определенной конфигурации в разных направлениях, рекомендуется оставить свободными переднюю и заднюю поверхности соответствующего слоя эквивалентного материала (рис. 6, а). Это достигается путем съема нижних досок задней стенки стенда и подъема его передней стенки после завершения укладки всех материалов модели и их полного схватывания или затвердения.

4.34. Для того, чтобы начать эксперимент, необходимо у самого днища стенда строго перпендикулярно его передней и задней стенкам просверлить сквозное горизонтальное отверстие в материале, имитирующем карстующиеся породы (рис. 6, б). Затем следует с помощью режущего инструмента (ножовочного полотна, напильника и т.п.) расширять первоначальное сквозное отверстие, имитируя при этом рост карстовой полости определенной конфигурации (рис. 6, в). При этом следует соблюдать строгую перпендикулярность стенок имитируемой полости передней и задней стенкам стенда. Свободные концы прокладок, имитирующих вертикальные трещины, должны срезаться, а отделенный от слоя материал должен удаляться из модели.

4.35. Если на модели не воспроизводятся карстующиеся породы или имитируется только горизонтальный рост карстовой полости с использованием опорных брусков (рис. 7, а), то для того, чтобы начать опыт, необходимо вынуть центральный опорный брусок (рис. 7, б). Дальнейшее расширение карстовой полости имитируется путем постепенного удаления остальных брусков (рис. 7, в), для чего необходимо вынуть брусок, примыкавший к удаленному с одной стороны, затем – брусок, примыкавший к нему с другой стороны и т.д. Этим достигается имитация почти одновременного роста карстовой полости в двух направлениях.

4.36. Имитация расширения карстовой полости должна производиться ступенями с шагом 0,5–1 см. Если такая имитация осуществляется согласно требованиям п. 4.33 настоящих Рекомендаций, контур полости, который она должна приобрести за одну ступень расширения, наносится на материал модели карандашом или процарапывается острым предметом, а затем производится выемка материала внутри этого контура. Если же рост

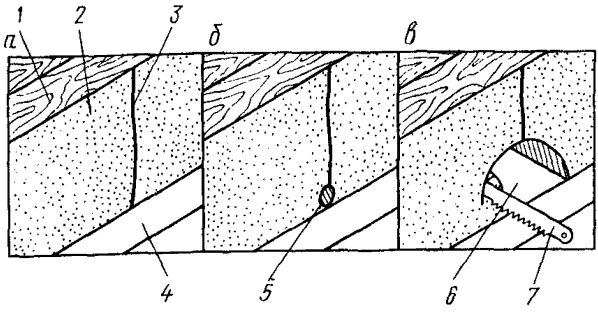


Рис. 6. Имитация роста карстовой полости во всех направлениях
а – до начала опыта; б – в начале опыта; в – в ходе опыта;
1 – задняя стенка стенда; 2 – материал, имитирующий карстующиеся породы; 3 – центральная трещина; 4 – днище стенда; 5 – первоначальное отверстие; 6 – имитируемая полость; 7 – режущий инструмент

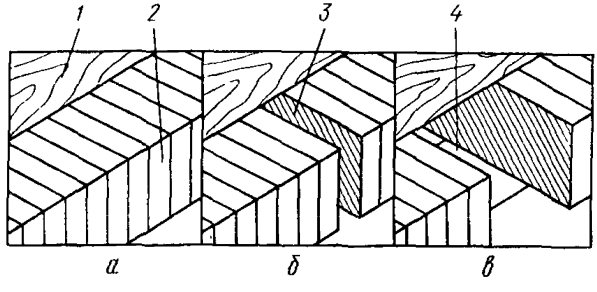


Рис. 7. Имитация горизонтального роста карстовой полости
а – до начала опыта; б – в начале опыта; в – в ходе опыта;
1 – задняя стенка стенда; 2 – опорный брусок; 3 – имитируемая полость; 4 – днище стенда

полости имитируется согласно требованиям п. 4.35, ступенью расширения является удаление одного опорного бруска.

Длительность выдерживания одной ступени расширения полости определяется временем стабилизации гравитационных деформаций, возникающих при этом в модели. Степень стабилизации должна определяться на основе показаний индикатора.

4.37. По окончании опыта необходимо удалить пригрузку (если она применялась при моделировании), а затем произвести разборку задней стенки стенда и, если это необходимо, опустить его переднюю стенку. Из неразрушенных частей отдельных слоев материалов модели вырезаются образцы для контрольных определений свойств эквивалентных материалов, после чего весь материал должен быть полностью удален из рабочей камеры стенда.

При этом необходимо помнить, что несцементированные, слабоувлажненные и сцементированные нетвердеющими вяжущими зернистые материалы могут быть использованы повторно.

4.38. Все необходимые сведения об условиях моделирования и материалах модели помещаются в специальный журнал, форма которого приводится в прил. 6. Данные о критических размерах имитируемой карстовой полости и характере разрушений, фиксируемые в ходе опыта, должны заноситься в рабочий журнал, форма которого представлена в прил. 7.

4.39. Опыты с применением эквивалентных материалов, как правило, должны повторяться при одних и тех же условиях моделирования не менее трех раз.

В прил. 8 рассматривается конкретный пример применения лабораторного физического моделирования на эквивалентных материалах для оценки карстоопасности.

Методика моделирования карстово-суффозионных процессов на установке системы В.П.Хоменко

4.40. При лабораторном физическом моделировании карстово-суффозионных процессов в качестве материалов моделей, как правило, используются горные породы натуры. Допускается применение в качестве материалов модели других нерастворимых зернистых фильтрующих сред.

4.41. В качестве фильтрующейся жидкости, как правило, должна использоваться водопроводная вода с обычной комнатной температурой, предварительно прокипяченная. Допускается замена кипячения воды ее длительным отстаиванием в открытом подающем сосуде, из которого она будет непосредственно поступать в экспериментальную установку.

4.42. Материалы модели должны подбираться таким образом, чтобы их водно-физические свойства соответствовали критерию подобия, представленного формулой (27). В случае применения в качестве материалов модели горных пород натуры подбор материалов модели должен осуществляться по величине коэффициента фильтрации.

4.43. Для определения коэффициента фильтрации материала модели он помещается в рабочую камеру при закрытой водоупорной системе (сквозное нарушение должно отсутствовать, как это показано на рис. 3). Затем при открытом резиновом шланге, соединяющем боковые водоприемные камеры, следует медленно заполнять их водой до определенного уровня, расположенного ниже поверхности материала модели, для чего необходимо закрепить выпускной штуцер правой боковой камеры

на данном уровне. В дальнейшем уровень воды в боковых камерах поддерживается автоматически с помощью герметизированного сосуда.

После того, как исследуемый материал будет насыщен водой, необходимо перекрыть шланг, соединяющий боковые камеры, и медленно опустить штуцер правой боковой камеры, установив его в более низком положении. При этом уровень воды в правой камере снизится, и в материале модели возникнет горизонтальный фильтрационный поток. Расход воды, вытекающей из выпускного штуцера, замеряется с помощью мерного сосуда и секундомера спустя 10–15 мин после фиксации штуцера. Коэффициент фильтрации k рассчитывается по следующей формуле:

$$k = 2\,QL / B\,(h_1^2 - h_2^2), \qquad (38)$$

где h_1 – высота столба воды в левой боковой камере; h_2 – то же, в правой боковой камере.

Определение коэффициента фильтрации необходимо повторить еще не менее двух раз при более низких положениях выпускного штуцера, но при том же уровне воды в левой боковой камере. Результаты определений заносятся в специальный журнал, форма которого представлена в прил. 9.

4.44. Допускается подбор материала модели, представленного породами натуры, не по величине коэффициента фильтрации, а по величине коэффициента пористости. Для этого следует отбирать режущими кольцами контрольные образцы исследуемого материала из пробных укладок его в рабочую камеру при различной степени уплотнения. Материал модели должен иметь приблизительно такую же пористость, что и воспроизводимая порода натуры.

Если в задачи моделирования не входит учет фактора времени, подбор материала модели, представленного породами натуры, должен осуществляться только по величине коэффициента пористости.

4.45. Подготовку опыта следует начинать с заполнения водой нижней водоприемной камеры, после чего производится сборка водоупорной системы. Для этого выдвижные водоупорные и опорные пластины должны располагаться таким образом, чтобы с одной стороны торцы выдвижных пластин находились в одной вертикальной плоскости, а с противоположной стороны опорная пластина выступала из-под водоупорной на ширину утяжеленной вставки. Затем пластины следует сдвинуть к центру до упора торцов опорных пластин друг в друга, а в зазор между

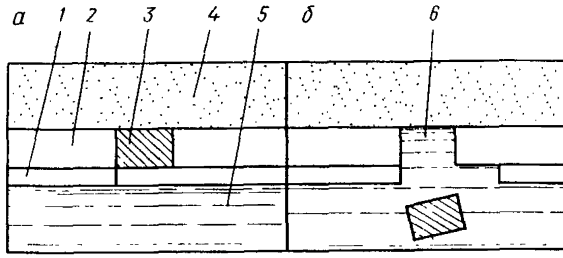


Рис. 8. Имитация образования сквозного нарушения в водоупоре, отделяющем надкарстовые воды от трещинно-карстовых

а – до начала опыта; б – в начале опыта;
1 – опорная пластина; 2 – водоупорная пластина; 3 – утяжеленная вставка; 4 – материал модели; 5 – нижняя водоприемная камера; 6 – имитируемое сквозное нарушение

торцами водоупорных пластин следует вложить утяжеленную вставку, занимающую центральное положение (рис. 8, а). Вставка должна подбираться в соответствии с условиями опыта из имеющегося набора. В дальнейшем она определяет ширину сквозного нарушения в водоупоре.

Затем следует поместить материал модели в рабочую камеру путем укладки отдельных увлажненных слоев толщиной 7–10 см, с уплотнением каждого слоя ручной трамбовкой и с разрыхлением его поверхности перед закладкой следующего слоя.

После этого материал модели насыщается водой согласно требованиям п. 4.43 настоящих Рекомендаций. В ходе насыщения соединительный шланг между нижней и правой боковой камерами должен оставаться открытым. По окончании насыщения его следует перекрыть зажимом. Во время подготовки опыта выпускные штуцеры нижней водоприемной камеры и напорного бака должны располагаться на одном уровне с выпускным штуцером правой боковой камеры. Соединительные шланги между боковыми камерами, а также между нижней камерой и напорным баком должны быть открытыми. В ходе опыта соединительный шланг между боковыми камерами постоянно остается открытым.

4.46. Для того чтобы начать опыт, необходимо создать сквозное нарушение в водоупорной системе путем выдергивания за рукоятку выдвижной опорной пластины, на которой установлена утяжеленная вставка. При этом утяжеленная вставка падает на дно нижней камеры (рис. 8, б). В определенных условиях гидродинамические разрушения могут начаться сразу же после

выпадения утяжеленной вставки. Если этого не происходит, опыт продолжается одним из четырех способов:

снижением напора воды в нижней камере при неизменном уровне воды в боковых, для чего необходимо перемещать вниз выпускной штуцер нижней камеры с одновременной подачей воды в боковые;

подъемом напора воды в нижней камере при неизменном уровне воды в боковых, для чего необходимо перемещать вверх выпускной штуцер нижней камеры и напорный бак с одновременной подачей в него воды;

снижением уровня воды в боковых камерах при неизменном уровне воды в нижней, для чего необходимо перемещать вниз выпускной штуцер боковой камеры с одновременной подачей воды в напорный бак;

подъемом уровня воды в боковых камерах при неизменном напоре воды в нижней, для чего необходимо перемещать вверх выпускной штуцер боковой камеры и работающую систему подачи в нее воды при перекрытом соединительном шланге между нижней камерой и напорным баком.

При этом подъем или снижение уровня воды в боковых камерах имитируют водоприток или водоотбор в покрывающих породах, а подъем или снижение напора воды в нижней камере – аналогичные процессы в карстующихся породах.

4.47. Напоры и уровни следует изменять ступенями с шагом 1 см, причем каждая ступень должна выдерживаться до стабилизации расхода воды, вытекающей из выпускных штуцеров. Степень стабилизации должна определяться путем замера расхода воды с помощью мерного сосуда и секундомера. Опыт продолжается до тех пор, пока перемещаемые выпускные штуцеры не достигнут крайних положений: верхней или нижней точек рабочей камеры. В зависимости от задач моделирования допускается прекращение опыта на более ранних стадиях.

4.48. По окончании опыта необходимо выпустить воду из всех водоприемных камер и напорного бака, а затем разгрузить рабочую камеру, отбирая при этом с помощью режущих колец образцы неразрушенных материалов модели для контрольных определений коэффициента пористости. После этого следует извлечь выпавшую утяжеленную вставку со дна нижней камеры и очистить камеру от вынесенного в нее материала. Затем необходимо тщательно промыть и прочистить все штуцеры и пазы. Следует помнить, что извлеченный из рабочей камеры материал модели пригоден для повторного использования.

4.49. Все необходимые сведения об условиях моделирования и материалах модели помещаются в специальный журнал, форма которого приводится в прил. 10. Данные о критических величи-

нах напоров и уровней воды в водоприемных камерах и характере разрушений, фиксируемые в ходе опыта, должны заноситься в рабочий журнал, форма которого представлена в прил. 11.

4.50. Опыты, воспроизводящие одни и те же натурные условия, должны проводиться не менее шести раз при различных линейных масштабах моделирования.

В прил. 12 приводится конкретный пример использования лабораторного моделирования на установке системы В.П.Хоменко для оценки карстово-суффозионной опасности техногенного происхождения.

Приложение 1

Основные буквенные обозначения

Буквы латинского алфавита:

B – ширина рабочей камеры экспериментальной установки;
C – концентрация растворяемого вещества в растворителе;
$C_н$ – концентрация насыщения (растворимость);
C_0 – начальная концентрация растворяемого вещества в растворителе;
c – удельное сцепление;
D – коэффициент диффузии растворяемого вещества;
d – ширина расширяющейся щели;
F – число Фурье;
H_1 – пьезометрический напор трещинно-карстовых вод;
H_2 – мощность надкарстового водоносного горизонта;
Ho – число гомохронности;
K – коэффициент скорости растворения;
k – коэффициент фильтрации;
L – длина рабочей камеры экспериментальной установки;
l – характерный линейный размер;
M – число Маргулиса;
$(\ )_M$ – параметр модели;
m – мощность слоя;
$(\ )_N$ – параметр натуры;
P – масса пригрузки;
Pe – число Пекле;
Pr – число Прандтля;
Q – объемный расход воды;
q – линейный расход растворителя на единицу длины поперечного сечения щели;
$R_р$ – сопротивление одноосному растяжению;
$R_с$ – сопротивление одноосному сжатию;
Re – число Рейнольдса;
r – скорость растворения;
$S_р$ – площадь поверхности растворения;
t – время;
V – скорость движения растворителя;
x – долевое содержание компонента в смеси;
$(\ )_x$ – параметр растворения, замеренный на расстоянии x от входного отверстия щели.

Буквы греческого алфавита:

γ – плотность;
$\gamma_р$ – плотность растворяемого вещества;
$\Delta(\ )$ – разница значений;
η – некоторое свойство материала модели;
μ – коэффициент водоотдачи;
ν – кинематическая вязкость растворителя;
ρ – скорость расширения щели;
φ – угол внутреннего трения

ЖУРНАЛ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД

Условия отбора образцов из пород натуры:

дата и место отбора _____

способ и глубина отбора, м _____

краткая стратиграфо-литологическая характеристка горной породы _____

Дата опыта _____

Формула, применяемая при обработке экспериментальных данных _____

Необходимые исходные данные		Показатели свойств	
		натуры	модели
Характеристика растворителя	Наименование		
	Температура, ^{o}C		
	Кинематическая вязкость, 10^{-6} м^2/с		
	Начальная концентрация растворяемого вещества, кг/м^3		
Характеристика растворяемого вещества	Наименование и химический состав (формула)		
	Средняя плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)		
	Коэффициент диффузии, 10^{-10} м^2/с		
Концентрация насыщения (растворимость), кг/м^3			
Число Прандтля			

ЖУРНАЛ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ХОДОМ РАСТВОРЕНИЯ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД

№ образца	Длина образца, м	Размеры поперечного сечения щели, 10^{-3} м (мм)		Время опыта, ч, мин		Продолжительность опыта, 10^4 с	Расход растворителя		Число Рейнольдса	Показания солемера, Ом	Концентрация растворяемого вещества на выходе из рабочего цилиндра, кг/м^3	Максимальная ширина щели в конце опыта, 10^{-3} м (мм)			Расширение щели за время опыта, 10^{-3} м (мм)	Коэффициент скорости растворения, 10^{-8} м/с	Число Маргулиса	Число Фурье	Число гомохронности	Число Пекле
		Длина	Ширина	Начало опыта	Конец опыта		объемный, 10^{-6} м^3/с (см^3/с)	линейный (на единицу длины поперечного сечения щели), 10^{-4} м^2/с (см^2/с)				на входе в рабочий цилиндр	на выходе из рабочего цилиндра	средняя						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Примечание. Графы 19 и 20 следует заполнять только в случае применения при обработке экспериментальных данных формулы (9). Гр. 21 следует заполнять только в случае применения формулы (10).

ПРИМЕР ОЦЕНКИ СКОРОСТИ РОСТА КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХИМИКО-КИНЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД

1. В ходе инженерных изысканий на участке строительства промышленного объекта в гипсовой толще была обнаружена заполненная водой карстовая полость, выходящая на контакт с покрывающими водопроницаемыми породами (рис. 1). В покрывающихся и карстующихся породах присутствует единый безнапорный горизонт грунтовых вод. На территории будущего строительного объекта действует эксплуатационная скважина, производящая отбор воды из карстующихся пород, в результате чего в обнаруженной полости происходит интенсивное нисходящее движение агрессивных подземных вод. Требуется оценить скорость расширения карстовой полости.

2. Сведения, выявленные в ходе дополнительных инженерно-геологических изысканий на карст, позволили полностью охарактеризовать условия растворения карстующихся пород: вода с температурой 9°С и концентрацией в ней сульфата кальция, равной 0,31 кг/м^3, движется в полости, имеющей поперечный размер 0,9 м, со скоростью $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ м/с. Согласно табл. 2 (с применением интерполяции), кинематическая вязкость воды с данной температурой составляет $1{,}35 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по формуле (4), где в качестве характерного линейного размера выступает поперечный размер полости, будет равно для рассматриваемых условий 87.

3. Для лабораторного изучения скорости растворения карстующихся пород использовалась экспериментальная установка с десятью рабочими цилиндрами. Растворяемым веществом служили горные породы натуры, отобранные при бурении скважин в ходе дополнительных изысканий на карст. В роли растворителя выступала водопроводная вода с температурой около 9°С. Согласно табл. 2 коэффициент диффузии гипса при данных условиях составляет $3{,}7 \cdot 10^{-10}$ м^2/с. Таким образом, эксперимент проводился при постоянном числе Прандтля, которое в соответствии с формулой (8) равнялось $36 \cdot 10^2$.

4. Необходимые определения, произведенные перед началом опыта, показали, что растворимость гипса, имеющего среднюю плотность 2,32 г/см^3, составляет 2,50 кг/м^3, а начальная концентрация сульфата кальция в водопроводной воде приблизительно равна нулю.

5. После проведения опыта обработка экспериментальных данных велась путем выявления отношения между критериями

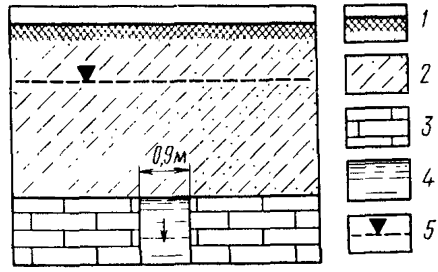


Рис. 1. Схематизированные природные условия, воспроизводившиеся в ходе химико-кинетического моделирования процессов растворения карстующихся пород

1 – поверхность земли; 2 – водопроницаемые покрывающие породы; 3 – карстующиеся породы; 4 – карстовая полость, заполненная водой; 5 – уровень грунтовых вод

подобия, представленного формулой (12). В результате была получена корреляционная зависимость между числами Рейнольдса и Маргулиса (рис. 2), выражающаяся эмпирической формулой:

$$10^4\,M = 4{,}88\,(Re)^{-0{,}328}. \qquad (1)$$

Согласно формуле (1), числу Рейнольдса, равному 87, должно соответствовать число Маргулиса, равное $1{,}13 \cdot 10^{-4}$.

6. В соответствии с формулой (19) коэффициент скорости растворения в натурных условиях равен $1{,}47 \cdot 10^{-8}$ м/с. После подстановки этой величины в формулу (2) была рассчитана скорость расширения полости. Она составляет $2{,}78 \cdot 10^{-11}$ м/с (или 0,88 мм/год). Таким образом, согласно полученным результатам, при неизменном фильтрационно-гидродинамическом режиме за столетний срок службы промышленного объекта карстовая полость в гипсах должна расширяться на 8,8 см, что приблизительно составляет 10% ее первоначального поперечного размера

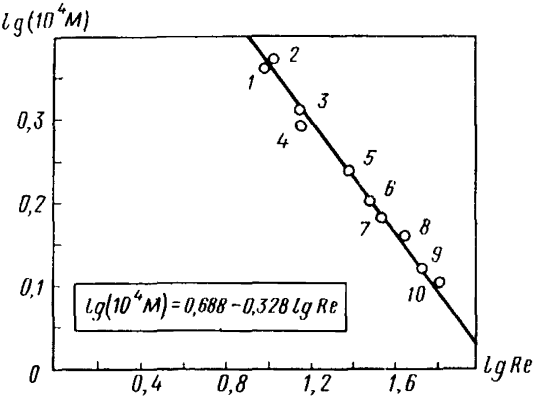


Рис. 2. График корреляционной зависимости десятичного логарифма увеличенного в 10^4 раз числа Маргулиса от десятичного логарифма числа Рейнольдса, построенный по результатам химико-кинетического моделирования процессов растворения карстующихся пород (1...10 – номера опытов)

ЖУРНАЛ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОБНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ СВОЙСТВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

№ определения	Содержание компонентов, %			Свойства эквивалентного материала				
	первого (наименование и состав)	второго (наименование и состав)	третьего (наименование и состав)	Плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)	Сопротивление одноосному растяжению, 10^5 Па (кгс/см^2)	Сопротивление одноосному сжатию, 10^5 Па (кгс/см^2)	Удельное сцепление, 10^5 Па (кгс/см^2)	Коэффициент внутреннего трения
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Примечание. В случае определения свойств материала, имитирующего скальные породы, не следует заполнять графы 8 и 9. В случае определения свойств материала, имитирующего глинистые породы, не следует заполнять графы 6 и 7. В случае определения свойств материала, имитирующего песчаные породы, не следует заполнять графы 6, 7 и 8.

ЖУРНАЛ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРСТОВО-ОБВАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Размеры рабочей камеры стенда, м: длина _____ , высота _____ , ширина _____
Линейный масштаб моделирования _____
Масса пригрузки, кг _____

№ слоя модели (сверху вниз)	Толщина слоя модели, м	Характеристика пород натуры					Характеристика эквивалентных материалов											
			Свойства				Состав, %				Свойства							
		Наименование	Плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)	Сопротивление одноосному растяжению, 10^5 Па (кгс/см^2)	Сопротивление одноосному сжатию, 10^5 Па (кгс/см^2)	Удельное сцепление, 10^5 Па (кгс/см^2)	Коэффициент внутреннего трения	Первый зернистый компонент (наименование)	Второй зернистый компонент (наименование)	Третий зернистый компонент (наименование)	Цементирующее вещество (наименование)	Плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)		Сопротивление одноосному растяжению, 10^5 Па (кгс/см^2)		Сопротивление одноосному сжатию, 10^5 Па (кгс/см^2)		Удельное сцепление 10^5 Па (кгс/см^2)		Коэффициент внутреннего трения	
												расчетная	фактическая	расчетное	фактическое	расчетное	фактическое	расчетное	фактическое	расчетный	фактический
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Приложение 7

ЖУРНАЛ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ХОДОМ КАРСТОВО-ОБВАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

№ опыта _____

Дата опыта _____

№ ступени	Время опыта, ч, мин		Размеры полости на модели, м		Показания индикатора, 10^{-5} м		Наблюдаемые явления
	начало ступени	конец ступени	ширина	высота	в начале ступени	в конце ступени	
1	2	3	4	5	6	7	8

Примечание. Гр. 5 следует заполнять только в случае имитации на модели роста карстовой полости во всех направлениях.

Приложение 8

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ДИАМЕТРА КАРСТОВО-ОБВАЛЬНОГО ПРОВАЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

1. В районе развития сульфатного карста, где ранее встречались единичные провалы с недостоверными сведениями об их диаметрах, предполагается строительство группы жилых зданий. В ходе инженерных изысканий одной скважиной была обнаружена полость в карстующихся породах на контакте с вышележащими покрывающими отложениями. Поперечный размер полости оценить не удалось. Для оптимального выбора конструктивных схем жилых зданий необходима оценка диаметра карстового провала, который может образоваться в данных условиях над полостью, достигшей в процессе растворения карстующихся пород критического поперечного размера.

2. Участок будущего строительства имеет следующее геологическое строение (рис. 1): закарстованные верхнепермские гипсы и ангидриты перекрыты четвертичными флювиогляциальными суглинками и песками, над которыми залегают покровные суг-

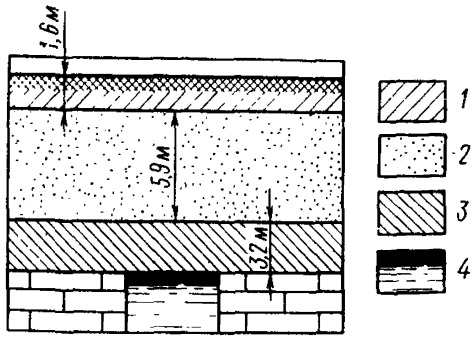


Рис. 1. Схематизированные природные условия, воспроизводившиеся в ходе моделирования карстового провалообразования на эквивалентных материалах

1 – суглинки мягкопластичные; 2 – пески; 3 – суглинки тугопластичные; 4 – карстовая полость, частично заполненная водой. Остальные обозначения даны на рис. 1 прил. 4

линки. Постоянные водоносные горизонты в покрывающих отложениях отсутствуют. В гипсах и ангидритах циркулируют безнапорные трещинно-карстовые воды.

3. В процессе изысканий были получены все необходимые исходные данные для воспроизведения толщи покрывающих пород на модели из эквивалентных материалов (см. таблицу).

№ слоя	Толщина слоя модели, м	Покрывающие породы				Эквивалентные материалы			
			Свойства				Свойства		
		Наименование и характеристика	Плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)	Удельное сцепление, 10^5 Па (кгс/см^2)	Коэффициент внутреннего трения	Состав, %	Плотность, 10^3 кг/м^3 (г/см^3)	Удельное сцепление, 10^5 Па (кгс/см^2)	Коэффициент внутреннего трения
1	0,18	Суглинок мягкопластичный	1,89	0,23	0,41	Глина – 3 Слюда – 38 Песок – 29 Масло – 30	1,50	0,02	0,41
2	0,67	Песок мелкий, влажный	1,90	–	0,70	Песок средней крупности, влажный – 100	1,51	–	0,70
3	0,36	Суглинок тугопластичный	1,96	0,32	0,49	Глина – 4 Слюда – 46 Песок – 17 Масло – 33	1,56	0,03	0,49

Для моделирования использовался стенд с высотой рабочей камеры 1,35 м. Условия поставленной задачи требовали полного воспроизведения на модели всей толщи покрывающих пород, поэтому желательный линейный масштаб моделирования был принят равным 1.7,9.

4. В качестве материала, воспроизводящего породы слоя 2, были использованы пески средней крупности со средней плотностью укладки, имеющие такой же угол внутреннего трения, что и пески натуры, и плотность 1,51 г/см^3. Таким образом, значение константы, входящей в критерий подобия, представленный формулой (24), становилось равным 1,26.

5. В качестве эквивалентных материалов, имитирующих глинистые породы слоев 1 и 3, использовались трехкомпонентные смеси сухой порошкообразной бентонитовой глины, молотого мусковита и мелкого кварцевого песка (фракция 0,10–0,25 мм) с трансформаторным маслом, выступающим в роли нетвердеющего вяжущего. Состав исходных компонентов был подобран таким образом, чтобы каждый из них походил на суглинок пластичной консистенции. Компонент 1 представлял собой смесь 75% глины с 25% масла, компонент 2 – смесь 60% слюды с 40% масла, компонент 3 – смесь 89% песка с 11% масла.

6. В результате определения свойств пробных смесей эквивалентного материала, имитирующего глинистые породы, и проведения необходимых расчетов согласно требованиям п. 4.26 настоящих Рекомендаций были отстроены графики-треугольники зависимостей свойств материала от его состава (рис. 2). Согласно графику при условии соблюдения критериев подобия, выраженных формулами (22) и (23), материал слоя 1 должен состоять из 4% компонента 1, 63% компонента 2 и 33% компонента 3, а материал слоя 2 – из 5% компонента 1, 76% компонента 2 и 19% компонента 3. Состав подобранных эквивалентных материалов (включая процентное содержание вяжущего) и их свойства приводятся в таблице.

7. В соответствии с критерием подобия, выраженным формулой (22), линейные масштабы моделирования составили: для слоя 1 – 1:9,1, для слоя 3 – 1; 8,5. Средний масштаб 1:8,8 приемлем для рассматриваемых условий моделирования (см. п. 3 настоящего приложения).

8. В ходе эксперимента горизонтальное расширение карстовой полости имитировалось путем удаления опорных брусков. Пригрузка отсутствовала. После проведения пяти опытов на моделях были получены следующие результаты: средний критический пролет карстовой полости, вызывающей провалообра-

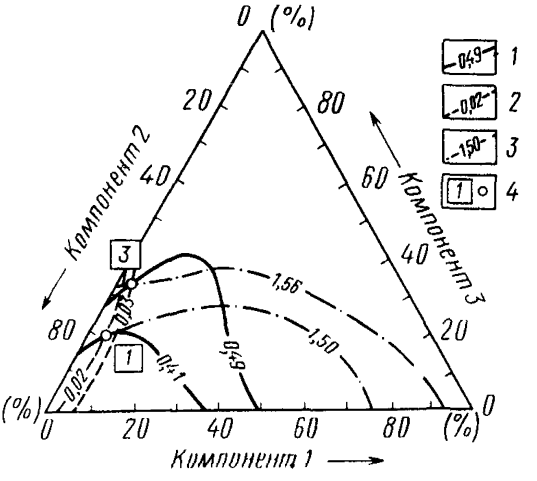


Рис. 2. Графики зависимости свойств материала, имитировавшего глинистые породы, от его состава

1 – изолиния коэффициента внутреннего трения; 2 – изолиния удельного сцепления, 10^5 Па (кгс/см^2); 3 – изолиния плотности, 10^3 кг/м^3 (г/см^3); 4 – номер слоя модели и соответствующий состав эквивалентного материала

зование, составил 0,97 м, а средний поперечный размер провала – 0,69 м. В пересчете на натуру прогнозируемый диаметр провала составляет 6,1 м.

Приложение 9

ЖУРНАЛ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ МАТЕРИАЛА МОДЕЛИ

Размеры рабочей камеры экспериментальной установки, м:

длина _____

ширина _____

Высота столба воды в левой боковой водоприемной камере, м_____

№ определения	Высота столба воды в правой боковой водоприемной камере, м	Объемный расход воды, 10^{-6} м^3/с (см^3/с)	Коэффициент фильтрации материала модели, 10^{-6} м/с
1	2	3	4

ЖУРНАЛ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Условия отбора пород натуры.

дата и место отбора _____

способ и глубина отбора, м _____

краткая стратиграфо-литологическая характеристика горной породы _____

Высота рабочей камеры экспериментальной установки, м _____

Необходимые исходные данные		Показатели свойств	
		натуры	модели
Фильтрующаяся жидкость	Наименование		
	Температура, °С		
Фильтрующий материал	Наименование		
	Коэффициент водоотдачи		
	Коэффициент фильтрации, 10^{-6} м/с		
	Коэффициент пористости		

Примечание. Крайнюю нижнюю строку следует заполнять только в случае подбора материала модели по величине коэффициента пористости согласно требованиям п. 4.44 настоящих Рекомендаций.

ЖУРНАЛ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ХОДОМ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

№опыта _____

Дата опыта _____

Ширина сквозного нарушения в водоупоре, 10^{-3} м (мм)_____

Высота слоя материала модели, м _____

Высота столба воды в боковых водоприемных камерах и напора воды в нижней водоприемной камере (за вычетом толщины водоупора) перед началом опыта, м _____

Линейный масштаб моделирования _____

№ ступени	Время опыта, ч, мин		Напор воды в нижней камере (за вычетом мощности водоупора) или высота столба воды в боковых камерах, м	Объемный расход воды, 10^{-6} м^3/с (см^3/с)		Наблюдаемые явления
	Начало ступени	Конец ступени		в начале ступени	в конце ступени	
1	2	3	4	5	6	7

Примечание. В гр. 4 следует помещать значение параметра претерпевающего изменение в зависимости от выбранных условий моделирования согласно требованиям п. 4.46 настоящих Рекомендаций.

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КРИТИЧЕСКОГО СНИЖЕНИЯ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО НАПОРА ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА УСТАНОВКЕ СИСТЕМЫ В.П.ХОМЕНКО

1. В районе распространения карбонатных пород, в которых встречаются древние карстовые полости, проектируется строительство железнодорожной линии. На одном из участков трассы предполагается оборудование группы эксплуатационных скважин, которые должны будут осуществлять интенсивный отбор подземных вод из закарстованных пород для целей водоснабжения. Это должно вызвать снижение пьезометрического напора трещинно-карстовых вод в пределах рассматриваемого участка.

2. В ходе инженерно-геологических изысканий было установлено, что на рассматриваемом участке будущей трассы закарстованные верхнекаменноугольные известняки перекрыты юрскими глинами, над которыми залегают четвертичные аллювиальные пески (рис. 1). Юрские глины представляют собой региональный водоупор, отделяющий горизонт напорных трещинно-карстовых вод от горизонта безнапорных надкарстовых вод, присутствующих в песчаных породах. Во время изысканий отметки напора трещинно-карстовых вод и уровня надкарстовых вод приблизительно совпадали. В ходе буровых и геофизических работ в известняках были обнаружены карстовые полости и трещиноватые зоны, а в глинах – сквозное нарушение с поперечным размером 0,5 м, расположенное над одной из полостей.

3. В связи с тем, что в процессе эксплуатации водозаборных скважин возникнет нарушение существующего гидродинамического режима, на рассматриваемом участке следует ожидать развития карстово-суффозионных процессов техногенного происхождения, способных привести к провалообразованию. Это обстоятельство требует расчета допустимой производительности водозабора, базирующегося на оценке критической величины снижения напора трещинно-карстовых вод под будущей железнодорожной линией. Для определения этой величины решено было использовать лабораторное моделирование на фильтрационной установке системы В.П.Хоменко.

4. В процессе инженерно-геологических изысканий из горных выработок были отобраны песчаные породы, которые в дальнейшем использовались в качестве материалов модели. Поскольку в задачи эксперимента не входил учет фактора времени, единственным условием моделирования было соблюдение геометри-

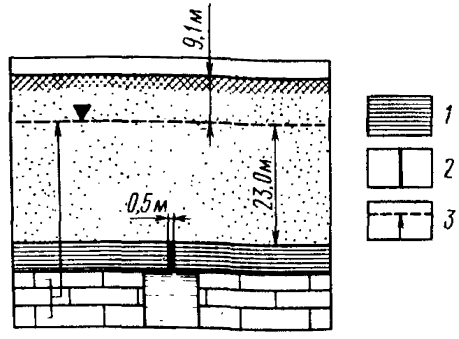


Рис. 1. Схематизированные природные условия, воспроизводившиеся в ходе моделирования карстово-суффозионных процессов на установке системы В.П.Хоменко

1 – водоупор, отделяющий надкарстовые воды от трещинно-карстовых; 2 – сквозное нарушение сплошности; 3 – пьезометрический напор трещинно-карстовых вод. Остальные обозначения даны на рис. 1 прил. 4 и на рис. 1 прил. 8.

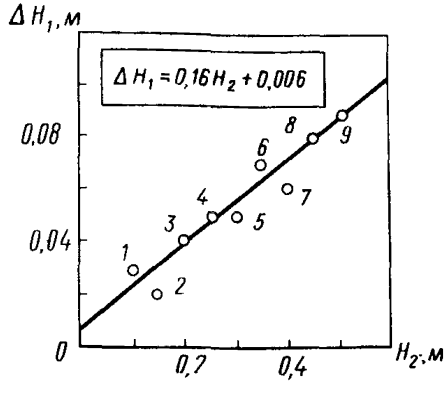


Рис. 2. График корреляционной зависимости критического снижения напора воды в нижней камере от высоты столба воды в боковых, построенных по результатам моделирования карстово-суффозионных процессов на установке системы В.П.Хоменко (1. . . 9 – номера опытов)

ческого подобия согласно требованиям п. 2.22 настоящих Рекомендаций.

5. Моделирование проводилось по схеме, предусматривающей снижение напора воды в нижней камере при неизменном уровне воды в боковых. Всего было проведено 9 опытов при различных линейных масштабах моделирования, причем наиболее крупный масштаб определялся высотой рабочей камеры фильтрационной установки, равной 0,71 м, и составил 1:46,1. В ходе опытов фиксировалась критическая величина напора воды в нижней камере, при которой начинался суффозионный вынос песков через сквозное нарушение в водоупоре. После обработки экспериментальных данных была получена корреляционная зависимость (рис. 2), выражающаяся формулой:

$$\Delta H_1 = 0{,}16\, H_2, \qquad (1)$$

где ΔH_1 – критическое снижение напора трещинно-карстовых вод, м.

Величина свободного члена в формуле (1) опущена в связи с ее крайней незначительностью.

6. После подстановки в формулу (1) натурной величины мощности надкарстового водоносного горизонта, равной 23 м, была получена критическая величина снижения напора трещинно-карстовых вод, которая не должна быть достигнута в процессе эксплуатации водозаборных скважин. Она составляет 3,7 м.

ПНИИИС Госстроя СССР

**Рекомендации
по лабораторному физическому моделированию
карстовых процессов**

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией *Л.Г.Бальян*
Редактор *Е.А.Волкова*
Мл. редактор *А.С.Бархина*
Технический редактор *Р.Я. Лаврентьева*
Корректор *Е.Р. Герасимюк*
Н/К

Подписано в печать 03.11.84 Т – 06711 Формат 84x108 1/32
Бумага офсетная № 2 Набор машинописный Печать офсетная
Усл.печ.л. 2,52 Усл.кр.-отт. 2,84 Уч.-изл.л. 2,89
Тираж 3000 экз. Изд. № ХП–739 Зак. № 1166
Цена 15 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
101898, Москва, Хохловский пер., 7

gost.e-ecolog.ru