

УДК 624.15:551.435.8

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

Уткин М. М.¹, Уткин М. В.²

^{1,2}АО «Гео Палитра», Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: ¹geokarst@mail.ru, ²mike531900@gmail.com

В статье изложен практический опыт лабораторных исследований по определению скорости растворения гипсовых пород, залегающих в пределах крупной карстовой полости и за ее пределами. Особое внимание уделено подготовке экспериментальных испытаний, которая осуществлялась с максимально возможным учетом 4 основных факторов, влияющих на скорость растворения. Испытания проводились на специально разработанной авторами экспериментальной установке. По результатам экспериментов подтверждено, что скорость растворения гипсовых пород в зоне крупных карстовых полостей серьезно возрастает (в рассматриваемом примере в среднем в 4,6 раза). Кроме того, в условиях неглубокого карста важно учитывать скорость расширения ослабленных зон, прилегающих к полостям.

Ключевые слова: карст, крупная карстовая полость, скорость растворения карстующихся пород, скорость роста карстовой полости, скорость расширения ослабленной зоны.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно действующим нормативным документам по проектированию зданий и сооружений [1, 2], при проведении инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях необходимо в полевых или лабораторных условиях выполнять количественную оценку скорости растворения карстующихся пород (см/год), используемую в дальнейшем для оценки размеров карстовой полости к окончанию расчетного срока службы (эксплуатации) сооружения. На основании размеров полости осуществляется прогностическая оценка карстовой опасности и, в некоторых случаях (например, при выполнении расчетов численными методами с применением геотехнических программ), проектирование противокарстовой защиты.

В зонах залегания крупных карстовых полостей режим движения подземных вод обычно является турбулентным (вихревым), при котором интенсивность протекания процесса растворения значительно выше, чем при ламинарном (слоистом) движении. Целью статьи является подтверждение изложенного обстоятельства количественной оценкой скорости растворения гипсовых пород, выполняемой в лабораторных условиях.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является участок строительства, находящийся в ~1,9 км северо-восточнее села Абабково Павловского района Нижегородской области. Территория участка приурочена ко II надпойменной террасе р. Кишма и характеризуется большим количеством разнообразных поверхностных карстовых форм, вследствие чего при районировании она была отнесена ко II категории карстовой опасности [3] и к опасной категории в карстово-суффозионном отношении [1].

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

Геологический разрез участка сложен отложениями четвертичной и пермской систем.

Четвертичные отложения представлены главным образом суглинком мягко- и тугопластичным, с прослоями песка средней крупности. Мощность покровной толщи небольшая, составляет всего 8,7 м.

Пермские отложения представлены только сульфатными породами (гипсами и ангидритами), так как глинистые и карбонатные породы полностью размыты. Верхняя часть сульфатной толщи (до глубины 30,2 м) сложена главным образом гипсом средней прочности трещиноватым, прослоями выветрелым до состояния щебня, дресвы и муки. В интервале глубин 11,0–13,0 м (высота 2,0 м) вскрыта полость, частично заполненная рыхлым песчано-глинистым материалом, с включениями щебня и дресвы сульфатных и карбонатных пород. В интервале 16,0–24,3 м (высота 8,3 м) вскрыта уже крупная полость, почти на 60% заполненная тем же материалом, что и вышеуказанная полость. С глубины 30,2 м сульфатная толща сложена чередующимися доломитизированными слоями гипса средней прочности трещиноватого и ангидрита в основном прочного.

Отдельно необходимо отметить, что первая полость расположена не в кровле карстующейся толщи, а именно перекрыта гипсовой балкой высотой 2,3 м. Вторая полость отделяется от первой аналогичной балкой высотой 3,0 м. Наличие гипсовых балок позволяет полостям развиваться в ширину до очень больших размеров. Поэтому балки могут уменьшать интенсивность возникновения и развития карстовых деформаций на дневной поверхности. Однако, если произойдет обрушение балки, то это приведет к мгновенному образованию крупного карстового провала.

Гидрогеологические условия участка характеризуются наличием грунтового и трещинно-карстового водоносных горизонтов.

Горизонт грунтовых вод приурочен к четвертичным отложениям. Водовмещающими грунтами являются прослойки песка, а также мягкопластичный суглинок. Воды безнапорные, вскрыты на глубине 1,5 м.

Трещинно-карстовый водоносный горизонт приурочен к пермским отложениям. Водовмещающими породами являются гипсы. Воды напорные, первоначально вскрыты на глубине 10,5 м, высота напора составила 7,4 м. По химическому составу вода сульфатная кальциевая, натриево-кальциевая. Ее минерализация в зоне полостей составила 1,643–1,968 г/л, за их пределами — 2,807–3,130 г/л.

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Скорость растворения карстующихся пород зависит от 4 основных факторов — химического состава и состояния пород, химсостава и скорости движения подземных вод, приуроченных к карстующимся породам. Поэтому при планировании и подготовке экспериментальных испытаний в максимальной степени учитывались все указанные факторы.

Испытуемые образцы вырезались из образцов ненарушенной структуры (монолитов), отобранных из глубокой карстологической скважины. Первые два образца отобраны в зоне карстовых полостей, а именно первый образец отобран из

первой гипсовой балки, а второй образец — из второй балки. Вторые два образца отобраны за пределами зон влияния карстовых полостей (в подошве верхней и кровле нижней части сульфатной толщи), что подтверждается результатами химических анализов и полевых опытно-фильтрационных работ, выполненных для различных интервалов трещинно-карстового водоносного горизонта.

С целью минимизации нарушений поверхностей растворения, сверление отверстий в испытуемых образцах производилось различными диаметрами буров и со средней скоростью проходки. Конечный диаметр отверстий составил около 12 мм.

Таким образом, при подготовке экспериментов в максимальной степени были учтены первые два фактора.

Подготовленные к проведению испытаний образцы пород высушивались в соответствующем шкафу. После этого у каждого образца измерялась масса (на аналитических весах с точностью 0,01 г) и линейные размеры (микрометром с точностью 0,001 мм).

При бурении карстологической скважины в необходимом объеме осуществлялся забор подземных вод, приуроченных к гипсовым породам, из интервала толщи, на который не оказывают влияние карстовые полости. Далее вода оперативно доставлялась в лабораторию для подготовки к проведению испытаний. Для вторых двух образцов трещинно-карстовая вода принята в качестве растворителя, а для первых двух — смешивалась с водопроводной водой, с целью снижения минерализации до той, которая имеет место в зоне карстовых полостей.

Скорость движения трещинно-карстовых вод является одним из основных параметров, оказывающих значительное влияние на скорость растворения гипсовых пород [4, 5, 6]. Она определялась по результатам проведения в карстологической скважине полевых опытно-фильтрационных работ, а именно двух одиночных откачек. Первая откачка выполнена для интервала залегания крупной карстовой полости, а вторая откачка – для интервала, расположенного существенно ниже указанной полости. Отметим, что во втором случае коэффициент фильтрации гипсовой толщи получен почти в 5 раз меньше, чем в первом.

Таким образом, при подготовке экспериментов в максимальной степени были учтены вторые два фактора.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания образцов пород проводились на специальной лабораторной экспериментальной установке (рис. 1), разработанной и изготовленной авторами настоящей статьи.

Экспериментальные испытания заключались в объемном расширении отверстия в образцах, в закрытой системе, при постоянном режиме фильтрации и ламинарном движении растворителя.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

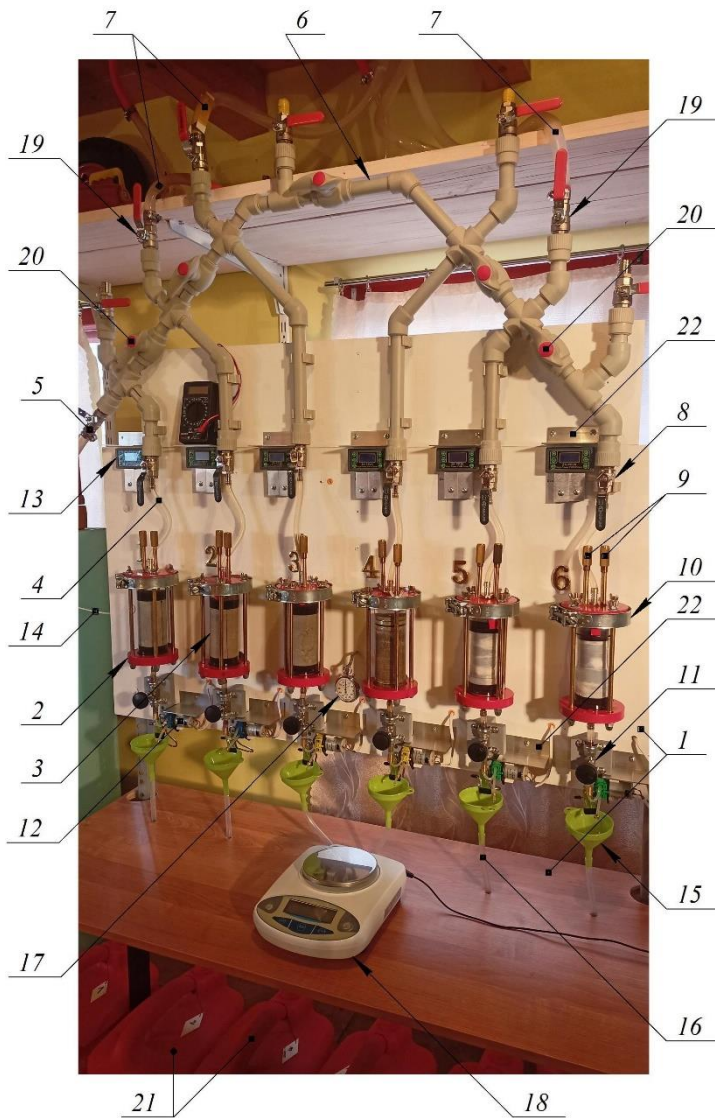


Рис. 1. Конструкция лабораторной экспериментальной установки для изучения скорости растворения карстующихся пород.

Условные обозначения: 1 — основание; 2 — рабочий цилиндр; 3 — образец растворяемой породы, установленный в рабочий цилиндр; 4 — соединительный шланг; 5 — сливной кран; 6 — распределительная гребёнка; 7 — шланги, подающие растворитель из напорных ёмкостей, расположенных на втором этаже лаборатории; 8 — подающий кран; 9 — прижимное устройство; 10 — хомут; 11 — выпускной кран; 12 — выпускной насос; 13 — пульт управления насосом; 14 — кабель питания; 15 — воронка; 16 — выпускной шланг; 17 — секундомер; 18 — аналитические весы; 19 —

перекрывающие краны; 20 — распределительные краны; 21 — приёмные ёмкости; 22 — защитные козырьки

Как отмечалось выше, режим движения подземных вод в зонах крупных карстовых полостей обычно является турбулентным. В настоящее время физическое моделирование такого движения вод в горных породах (особенно скальных) является весьма трудоёмкой задачей. Поэтому в данной работе все испытания выполнены при ламинарном движении. Принятое допущение, по нашему мнению, не приведет к потере достоверности результатов первых двух экспериментов, поскольку в зоне полости были исследованы и учтены в испытаниях химсостав воды и скорость ее движения.

В процессе проведения экспериментов на стандартный химический анализ отбирались пробы растворителя до и после его протекания через рабочие цилиндры. Результаты исследований показаны в таблице 1. Кроме того, ежедневно контролировался расход растворителя, прошедшего через каждый цилиндр.

Продолжительность всех экспериментов составила 35 суток.

Таблица 1.

Результаты стандартного химического анализа проб растворителя

№ обр. п/п	Условие отбора пробы растворителя	Анионы, мг/л			Катионы, мг/л			Сумма ионов, г/л
		HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	$Na+K$	
1	До прохождения рабочего цилиндра №4	228,80	21,3	835,6	428,86	2,43	6,21	1,532
		201,40	19,5	888,1	372,74	46,17	1,38	1,540
	После прохождения цилиндра №4	213,60	20,4	1063,0	424,85	26,73	67,39	1,824
		198,32	19,5	1139,8	384,77	41,31	114,54	1,904
2	До прохождения рабочего цилиндра №5	210,50	22,2	1084,0	384,77	36,45	105,11	1,851
		201,40	19,5	1160,8	356,71	43,74	154,33	1,944
	После прохождения цилиндра №5	213,60	21,3	1230,8	408,82	34,02	152,72	2,069
		198,30	17,7	1443,9	372,74	43,74	268,64	2,352
3	До прохождения рабочего цилиндра №6	280,70	23,0	1692,2	569,14	48,60	189,06	2,811
		244,08	19,5	1923,0	541,08	43,74	324,07	3,105
	После прохождения цилиндра №6	286,80	25,7	1683,3	561,12	58,32	179,17	2,803
		250,18	21,3	2069,8	577,15	46,17	352,13	3,326
4	До прохождения рабочего цилиндра №7	283,70	23,9	1497,7	565,13	51,03	97,52	2,529
		250,20	21,3	1692,2	553,10	72,90	148,35	2,748
	После прохождения цилиндра №7	280,70	24,8	1692,2	577,15	55,89	167,44	2,808
		247,13	21,3	1944,0	533,06	60,75	314,18	3,130

Примечание к таблице 1: пробы растворителя без выделения заливкой отобраны в начале экспериментов, а пробы с серой заливкой — в середине экспериментов.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

После завершения экспериментов испытанные образцы высушивались, с целью определения изменений массы и линейных размеров. Общий вид нескольких испытанных образцов показан на рис. 2.

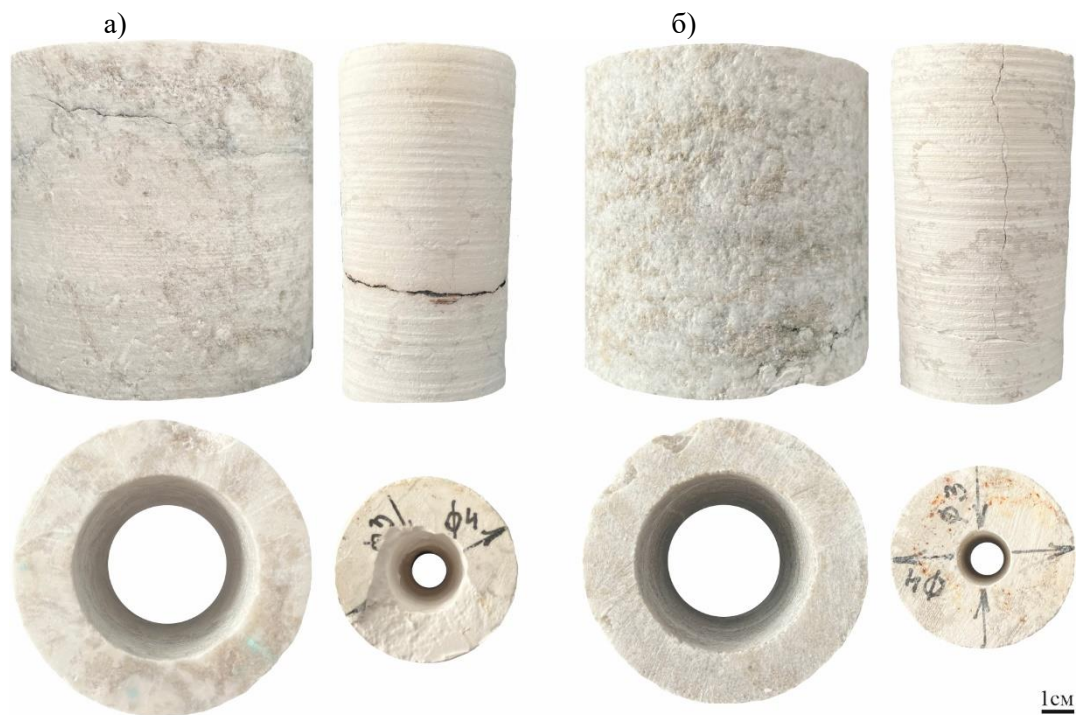


Рис. 2. Общий вид образцов ненарушенной структуры (слева) и испытанных образцов (справа): гипс в зоне крупной карстовой полости (а) и за ее пределами (б)

Линейная скорость растворения карстующихся пород V (см/сут), за время проведения экспериментальных испытаний, вычислялась по формуле

$$V = \frac{d_1 - d_0}{t}, \quad (1)$$

где d_0 и d_1 — диаметр отверстия в нижнем сечении образца, определяемый прямыми измерениями, соответственно, до и после эксперимента; t — продолжительность эксперимента.

Линейная скорость расширения ослабленной зоны V_{wz} (см/сут), прилегающей к карстовой полости, в первом приближении оценивалась следующим образом

$$V_{wz} = \left(\frac{\bar{d}_{1m} - \bar{d}_0}{t} \right) - V, \quad (2)$$

где \bar{d}_0 и \bar{d}_{1m} — средний диаметр отверстия по длине образца, определяемый, соответственно, до эксперимента прямыми измерениями и после эксперимента расчетом через потерю объема образца. Последняя величина может быть вычислена по формуле

$$\bar{d}_{1m} = \bar{d}_0 + \sqrt{\frac{4\Delta V_d}{\pi l}}, \quad (3)$$

где l — длина образца; ΔV_d — потеря объема сухого образца, оцениваемая через отношение потери массы сухого образца Δm_d к плотности сухой породы ρ_d .

Впоследствии величины V и V_{wz} пересчитывались на годовые путем линейной экстраполяции. Основные исходные данные и результаты экспериментальных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные исходные данные и результаты экспериментальных испытаний

№ обр. п/п	Условия залегания образца	Скорость движения растворителя, м/сут	Приращение диаметра отверстия, Δd , мм	Скорость растворения породы, V , см/год	Скорость расширения ослабленной зоны, V_{wz} , см/год
1	В зоне крупной карстовой полости	36,7	6,77	7,06	4,80
2		36,7	5,08	5,30	5,41
3	Вне зоны влияния карстовых полостей	7,4	1,10	1,14	5,79
4		7,4	1,46	1,52	5,32

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

После протекания растворителя через первый, второй, третий и четвертый испытуемые образцы минерализация растворителя в среднем увеличивается на 0.328, 0.313, 0.107 и 0.331 г/л (в 1.22, 1.17, 1.03 и 1.13 раза) соответственно (см. таблицу 1). Данные результаты хорошо соотносятся с результатами определения скорости растворения карстующихся пород (см. таблицу 2). Например, если рассмотреть результаты исследований по первым двум образцам, то наибольшее возрастание минерализации и, следовательно, максимальная скорость растворения получены для первого образца.

Увеличение минерализации растворителя происходит главным образом за счет выноса ионов SO_4 и $Na+K$. Вероятно, указанные ионы, взаимодействуя между собой, могут образовывать сульфаты натрия (Na_2SO_4) и/или калия (K_2SO_4), являющиеся легкорастворимыми солями (растворимость Na_2SO_4 в дистиллированной воде при температуре $10^\circ C$ составляет 9,6 г/100 мл, а K_2SO_4 — 9,3 г/100 мл, тогда как растворимость гипса в указанной воде составляет всего 0,244 г/100 мл).

Как показывает практический опыт по проведению данных экспериментов, легкорастворимые соединения активно выносятся не только с цилиндрической поверхности отверстия, но и с прилегающей к нему зоны. Поэтому скорость растворения карстующихся пород (роста пролета карстовых полостей) определялась

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

прямыми измерениями через приращение диаметра отверстия в испытуемых образцах, а скорость расширения ослабленных зон, прилегающих к полостям, – расчетом исходя из потери массы образцов.

Скорость расширения ослабленных зон изменяется незначительно (в 1,2 раза), так как во всех четырех экспериментах гипсы характеризовались примерно одинаковой пористостью и трещиноватостью. Следует отметить, что помимо карстовых полостей, приемником для вышележащих слабосвязных и в особенности несвязных отложений могут являться ослабленные зоны. Это обстоятельство важно учитывать при оценке карстовой опасности. Кроме того, в ослабленных зонах могут заметно снижаться физико-механические характеристики пород, что рекомендуется учитывать при проектировании зданий и сооружений, особенно в условиях неглубокого карста (при опирании подземных конструкций сооружений непосредственно на карстующиеся породы и при залегании карстующихся пород в пределах сжимаемой толщи основания).

Скорость растворения гипсовых пород в зоне крупной карстовой полости получена больше в 3,5–6,2 раза (в среднем в 4,6 раза), чем вне зоны ее залегания. Среднее значение скорости растворения в зоне полости составило 6,18 см/год, за ее пределами — 1,33 см/год.

Таким образом, скорость растворения карстующихся пород в зонах крупных карстовых полостей, как правило, значительно выше, чем за пределами данных зон. При этом наибольшее значение скорости растворения (7,06 см/год) не так сильно отличается от максимального значения (10 см/год), указанного в таблице 6.16 СП [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорость растворения карстующихся пород в зонах крупных карстовых полостей серьезно возрастает (в рассматриваемом примере в среднем в 4,6 раза). Скорость расширения ослабленных зон, прилегающих к полостям, необходимо принимать во внимание, особенно в условиях неглубокого карста. Оба параметра имеют важное практическое значение при выполнении оценки карстовой опасности и разработке противокарстовой защиты сооружений на сильно закарстованных территориях.

В качестве одного из направлений дальнейших исследований несомненный интерес представляет проведение продолжительных экспериментов по определению скорости растворения карстующихся пород в полевых условиях и сравнении их результатов с лабораторными экспериментами.

Список литературы

1. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями №1, 2, 3, 4). М.: Минстрой России, 2021.
2. СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2021.
3. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2003.

4. Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов / ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1984.
5. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
6. Уткин М. М., Уткин М. В. Практический опыт определения скорости растворения карстующихся пород в лабораторных условиях на одном из этапов скоростной автомобильной дороги М-12 «Москва - Нижний Новгород - Казань» // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Нижний Новгород, 2022. № 2. С. 61–68.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE GYPSUM DISSOLUTION RATE IN THE ZONE OF A LARGE KARST CAVITY AND BEYOND ITS

Utkin M. M.¹, Utkin M. V.²

^{1,2}*JSC Geo Palitra, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

E-mail: ¹geokarst@mail.ru, ²mike531900@gmail.com

The article describes the practical experience of laboratory research to determine the dissolution rate of gypsum rocks occurring within a large karst cavity and beyond its. The research site is located northeast of the Ababkovo village (Nizhny Novgorod Region). This territory is characterized by a large number of various surface karst forms. As a result, the area was behaved to II karst danger category and to the dangerous category in the karst-suffusion relation. During laboratory tests, four main factors were taken into account: the chemical composition and condition of the rocks, the chemical composition and the movement speed of groundwater. The tests were carried out on an experimental setup (developed by the authors) using a methods that took into account the basic requirements for such research and previously accumulated practical experience. It has consisted of a volumetric expansion of the hole in the samples in a closed system with a constant filtration mode and laminar movement of the solvent. Based on the experiment's results, the gypsum dissolution rate in the area of large karst cavities increases significantly (in the experiment samples, on average 4.6 times). In addition, in shallow karst conditions, it is important to consider the rate of expansion of weakened zones adjacent to cavities.

Keywords: karst, large karst cavity, dissolution rate of karst rocks, rate of karst cavity growth, expansion rate of the weakened zone.

References

1. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Soil bases of buildings and structures]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83* (s Izmeneniyami №1, 2, 3, 4). Moscow, Minstroy Rossii, 2021.
2. SP 499.1325800.2021. Inzhenernaya zaschita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot karstovo-suffozionnykh protsessov. Pravila proektirovaniya [Engineering protection of territories, buildings and structures from karst-suffusion processes. Design rules]. Moscow, Minstroy Rossii, 2021.
3. SP 11-105-97. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. CHast' II. Pravila proizvodstva rabot v rajonah razvitiya opasnyh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh processov [Engineering geological site investigations for construction. Part II. Rules of work in areas of development of hazardous geological and engineering-geological processes]. Moscow, Gosstroj Rossii, 2003.
4. Rekomendacii po laboratornomu fizicheskomu modelirovaniyu karstovykh processov [Recommendations for laboratory physical modeling of karst processes] / PNIIS. Moscow, Strojizdat, 1984.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСОВЫХ
ПОРОД В ЗОНЕ КРУПНОЙ КАРСТОВОЙ ПОЛОСТИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

5. Sokolov D. S. Osnovnye uslovija razvitiya karsta [Main conditions for the karst development]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1962, 322 p. (in Russian).
6. Utkin M. M., Utkin M. V. Prakticheskij opyt opredeleniya skorosti rastvoreniya karstuyushchihsya porod v laboratornyh usloviyah na odnom iz etapov skorostnoj avtomobil'noj dorogi M-12 «Moskva - Nizhnij Novgorod - Kazan» [Practical experience in determining the karst rocks dissolution rate in laboratory conditions at one of the stages of the M-12 “Moscow – Nizhny Novgorod – Kazan” expressway]. Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. Nizhnij Novgorod. 2022. № 2. pp. 61–68. (in Russian).

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.