

# К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКОМЕНДАЦИЙ СП 22.13330.2016

## ESTIMATION OF KARST HAZARD PARAMETERS USING RECOMMENDATIONS SP 22.13330.2016

В. А. КОВАЛЁВ, канд. техн. наук

А. Б. ПАТРИКЕЕВ

В. И. ШЕЙНИН, д-р техн. наук

*Анализируются относящиеся к прогнозу карстово-суффозионной опасности разделы действующих нормативных документов по инженерно-геологическим изысканиям и проектированию оснований и фундаментов. Описана и реализована схема применения рекомендаций СП 22.13330.2016 для оценки возможности и масштабов проявлений карстовой опасности. Показано, что для условий распространения карбонатных карстающихся пород для многих «потенциально опасных» площадок карбонатного карста использование этих рекомендаций позволяет обоснованно перевести их в категорию «неопасных».*

### Ключевые слова:

*Карбонатные породы, карст, категории опасности, коэффициент устойчивости, расчет, рекомендации, строительные нормы*

*The sections of the current regulatory documents on engineering&geological surveys and the design of bases and foundations related to the forecast of karst-suffusion danger are analyzed. A scheme for applying recommendations of SP 22133302016 is described and implemented to assess the possibility and extent of manifestations of karst hazard. It is shown that for the conditions of carbonate karst for many «potentially dangerous» areas, the use of these recommendations allows to reasonably convert them into the category of «non-hazardous».*

### Key words:

*Building codes, calculation, carbonate rocks, hazard categories, karst, recommendations, resistance coefficient*

### Введение

Процедура оценки карстоопасности площадки проектируемого строительства обычно начинается с анализа имеющейся архивной документации или фиксации положения этой площадки на имеющихся картах районирования и предварительного назначения категории карстоопасности (опасная, потенциально-опасная, неопасная)

[1, 2, 3]. Окончательная оценка карстоопасности проводится с учетом результатов проведенных изысканий.

В [4, 5] перечисляются признаки территорий, которые следует характеризовать как «опасные» по степени возможности проявления карстовых или карстово-суффозионных процессов. Соответственно в [4, 5] дается определение территорий, которые должны относиться к «потенциально-опасным», и указывается, что такие районы характеризуются меньшей степенью развития признаков, характерных для опасных районов факторов.

В [4] дополнительно дается определение «неопасных» районов: «Неопасные районы характеризуются отсутствием проявления карста на поверхности земли, наличием водоупоров из юрских и каменноугольных глин, перекрывающих закарстованные породы, толщиной, **как правило**, более 10 м и отсутствием нарушенного режима подземных вод».

Наконец, в обоих указанных источниках подчеркивается: «в потенциально опасных районах отдельные участки застройки также **могут оказаться опасными или неопасными**».

Отсутствие или недостаточная мощность водоупорного слоя достаточной мощности является обычно основным (а часто, и единственным) аргументом в пользу того, что конкретная территория должна быть отнесена к категории «потенциально опасных» или «опасных».

Сделанное в цитированных выше документах уточнение «**как правило**» в определениях потенциально опасных и опасных районов существенно, так как открывает «законную» возможность не основываться только на указанном признаке и на выполненной по карте [3] идентификации, а провести дополнительный анализ и, несмотря на отсутствие достаточной мощности водоупорного слоя, показать, что тот или иной конкретный участок должен характеризоваться как «неопасный» в отношении возможности образования карстовых провалов.

### Основной раздел

В СП 22.13330.2016 [6], утвержденном приказом Минстроя РФ от 10.12.2016 г и введенном в действие с 01 июля 2017 года (п. 6.12.8), приводится помещенная далее классификация категорий опасности участков строительства в карстово-суффозионном отношении.

Таблица 1

#### Категории опасности участка строительства в карстово-суффозионном отношении

<i>Признаки</i>	<i>Неопасная</i>	<i>Потенциально опасная</i>	<i>Опасная</i>
Поверхностные проявления карстовых деформаций	Отсутствуют	Отсутствуют	Присутствуют
Подземные проявления карстовых процессов	Отсутствуют	Средней интенсивности	Высокой интенсивности
Водоупор, перекрывающий водорастворимые горные породы, при толщине $h_w$ , м	$h_w > 10$	$10 \geq h_w \geq 3$	$h_w < 3$
Градиент вертикальной фильтрации, $i$	$i < 1$	$1 < i < 3$	$i > 3$

Существенно, что в упомянутом нормативном документе [6] классификация по категориям, основанная на частоте проявления карстовых форм в единицу времени на единицу площади, вообще не упоминается. Это связано с тем, что указанная классификация практически никогда не реализуема в силу отсутствия достоверных исходных данных, имеет, скорее, познавательный, чем инженерный смысл и может применяться только на уровне территориального планирования для оценки экономической целесообразности строительства.

Что касается характеристики площадки по градации значений «градиента вертикальной фильтрации», то, как отмечается в [12, 13], эта величина, с которой связана возможность возникновения «гидравлического разрыва», трудно определима и может изменяться во времени при изменении гидрогеологических условий. Вообще, «суффозионная» опасность при отсутствии технологических факторов может реализоваться лишь при наличии открытых полостей в потенциально карстующемся массиве.

В большинстве случаев площадки строительства на территории Москвы в зонах, отмеченных на картах [3] как «опасные» и «потенциально опасные», расположены в пределах распространения карбонатного карста [8]. Указанная особенность до появления СП [6] практически не учитывалась ни составителями карт, ни в рекомендациях, ни в нормативных документах по определению параметров интенсивности карстово-суффозионных процессов. На самом деле такие площадки, распложенные над известняками, могут «претендовать» на то, чтобы в большинстве случаев считаться «неопасными». Далее, следуя указаниям [6], рассмотрены различные аргументы, на которых можно обосновать ту или иную идентификацию категории карстово-суффозионной опасности и решить вопрос о необходимости выполнения тех или иных противокарстовых мероприятий.

Отметим, что если какая-либо площадка «потенциально опасная» или, тем более «опасная», то согласно [6, 7 и др.] на ней «применение отдельно стоящих фундаментов не допускается». Однако очевидно, что большинство возведенных ранее (до 1950-1960 гг.) сооружений и зданий в Москве традиционно опираются на отдельно стоящие или ленточные фундаменты без продольной жесткости, поскольку когда проектировались и строились эти здания, о карстовой опасности никто не задумывался. Однако до сих пор не зафиксировано вызванных карстовыми провалами деформаций надфундаментных конструкций зданий за все время существования «старого» фонда жилых и общественных зданий в городе Москве (за исключением отдельных случаев, являющихся следствием техногенных воздействий).

Существенно, что методика, схемы и порядок геомеханических расчетов, связанных с оценкой карстовой опасности, по существу не «прописаны» в обязательных нормативных документах. Приведенные в [6] требования к этим расчетам сводятся к указаниям, что «прогнозируемые параметры карстовых деформаций определяют расчетом с использованием вероятностно-статистических и (или) аналитических методов» и что «основным расчетным параметром при проектировании противокарстовой защиты сооружения является расчетный диаметр карстового провала», для выполнения расчета которого «необходимо привлекать специализированные организации».

В качестве наиболее достоверного способа оценки параметров карстообразования в инженерно-геологических источниках [1, 2, 5 и др.] до последнего времени указывалась статистическая обработка данных о выявленных на рассматриваемой площадке (или на аналогичных территориях) провалах и оседаниях земной поверхности, вызванных развитием карста. Однако из практики изысканий известно, что из-за отсутствия или из-за недостаточного объема достоверных данных как об общем количестве карстопоявлений на территории, так, особенно, о динамике их появления во времени такой подход удастся реализовать лишь в исключительно редких случаях.

В литературе приводятся различные варианты методики расчетного определения диаметра «провальной воронки»  $D$  [9 и др.], задание которого, как следует из рекомендаций [1 и др.], требуется для установления категории карстовой опасности. При этом практически все такие методики основаны на сравнении удерживающих  $T$  и сдвигающих  $Q$  сил, действующих на цилиндр диаметром  $D$ , выделенный в массиве грунта, залегающем на толще карстующихся пород. В случае однородной (или характеризующейся осредненными значениями грунтовых характеристик) толщи мощностью  $H$  сдвигающая сила, вызывающая возможное перемещение грунтов в гипотетическую полость, складывается из веса пород в объеме цилиндра и внешней нагрузки, приложенной на поверхности:

$$T(R) = \pi R^2 (\gamma H + p_s), \quad (1)$$

где  $R$  – радиус цилиндра,  $\gamma$  – удельный вес грунта,  $p_s$  – давление на поверхности.

Удерживающие силы  $Q$  – результат суммарного действия на боковую поверхность цилиндра возрастающей с глубиной  $z$  силы трения  $\sigma_x(z) \cdot \operatorname{tg} \varphi$  и сцепления  $c$ , не зависящего от  $\sigma_x(z)$ . При этом горизонтальное давление  $\sigma_x(z) = \xi \sigma_z(z)$ , где  $\sigma_z(z) = \gamma z + p_s$ ,  $\xi = \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2)$  – коэффициент распора. Тогда

$$Q(R) = 2\pi R \int_0^H (\xi \operatorname{tg} \varphi (\gamma z + p_s) + c) \cdot dz = \pi R H \{((\gamma H + p_s) \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2) + 2c)\}. \quad (2)$$

Отношение  $Q(R)/T(R)$  принято, следуя [9], называть коэффициентом устойчивости  $K(R)$ . Полагая  $K(R) = 1$ , т. е. приравнивая значения  $Q(R)$  и  $T(R)$  и решая относительно  $R$ , получают значение  $R_{\text{кр}}$ , при котором сдвигающее усилие окажется равным удерживающему и, следовательно, произойдет сдвиг выделенного цилиндра грунта и образование провала.

$$R_{\text{кр}} = 2[CH + (\gamma H^2/2 + p_s H) \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2)] / (\gamma H + p_s). \quad (3)$$

По существу, такой подход основан на так называемой модели Бирбаумера [12], предложенной для расчета давления на крепь горной выработки. Анализ ограниченной применимости для определения расчетного диаметра провала такого, на первый взгляд, полезного и удобного благодаря его простоте «инженерного» подхода дан, например, в [12, 15]. При этом следует отметить, что «геомеханические» (в том числе и широко используемые) методы расчета, основанные на этом подходе, часто содержат неточности и противоречия при записи простых формул типа (1) – (3), а выбор конкретной «методики» практически определяется тем, какая из них дает меньшие значения  $R_{\text{кр}}$ .

Существенно, что в многочисленных работах, где этот подход в разных вариантах используется для расчета размеров карстового провала на поверхности, не дается каких-либо указаний и предположений о размерах (да и о самом наличии) полости в карстующихся породах, подстилающих грунтовую толщу. По-видимому, негласно принимается, что полость есть, а ее размеры в плане таковы, что в нее мог бы «провалиться», хотя бы на некоторую глубину, столб грунта с соответствующим диаметром  $D$ , т. е. размеры фактически существующей у кровли карстующихся пород полости в плане должны быть больше  $D$ . Фактически при использовании «модели Бирбаумера» или «модели М. М. Протодяконова» [14] прогнозируется вовсе не максимальный размер провала в грунтовом массиве, а минимальный размер полости у кровли карстующегося массива, необходимый для того, чтобы в вышележащей толще произошел провал или реализовалось образование свода (при принимаемых предположениях о механизме его образования). О фактическом состоянии карстующегося массива не делается никаких предположений, и оно никак в этих расчетах не учитывается. Вычисление по различающимся лишь в деталях методикам расчета «диаметра провала» в надкарстовой толще без информации о том, есть ли куда «проваливаться» грунту из этой толщи, в настоящее время все большим числом специалистов начинает признаваться неинформативным [13].

Подход, заложенный в [6], представляется более рациональным и содержательным. Суть его состоит в том, что исследование процессов карстообразования должно начинаться с исследования и определения (или хотя бы экспертной оценки) параметров возможных полостей в карстующихся породах, особенно вблизи их кровли. Исходя из оценок этих параметров, далее путем выполнения соответствующих геотехнических расчетов должны оцениваться параметры последствий карстообразования (наличие и диаметр провала или глубина и форма мульды оседаний на поверхности [12, 15, 16]), а также необходимость выполнения мероприятий противокарстовой защиты и в случае их необходимости – рассчитываться параметры этих мероприятий.

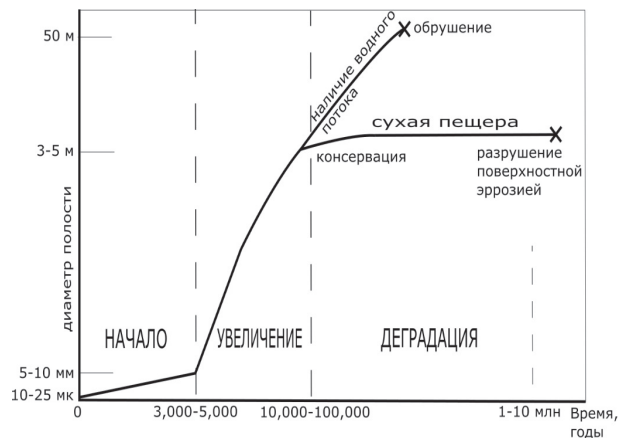
Покажем здесь приведенную в [6] таблицу значений скорости растворения различных видов потенциально карстующихся горных пород. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что отличительной особенностью карбонатных пород, которые, в основном, и слагают в пределах Москвы потенциально карстующиеся толщи, является низкая скорость растворения в естественных гидрогеологических условиях.

Таблица 2

### Характеристики скорости растворения горных пород

<i>Разновидность скальных грунтов по растворимости</i>	<i>Преобладающий минерал</i>	<i>Степень растворимости <math>q_{sr}</math>, г/л</i>	<i>Скорость растворения, см/год</i>
Нерастворимый	SiO <sub>2</sub>	$q_{sr} \leq 0,01$	0,01-0,1
Труднорастворимый	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	$0,01 < q_{sr} \leq 1$	0,1-1,0
Среднерастворимый	CaSO <sub>4</sub>	$1 < q_{sr} \leq 10$	1,0-10
Легкорастворимый	NaCl KCl	$10 < q_{sr} \leq 100$	10-100
Сильно растворимый		$q_{sr} > 100$	>100

Согласно литературным источникам [8], скорость растворения карбонатных пород колеблется от долей миллиметра до 2-3 мм в год. Для иллюстрации того, что в известняках за период эксплуатации сооружения (100...200 лет) не могут возникнуть новые полости заметных размеров или реально увеличиться размеры существующих полостей, приведем на рис. 1 график, построенный в [17] на основе архивации и анализа данных различных исследователей. На этом графике по горизонтальной оси – интервалы времени (годы), а по вертикальной – размеры полостей, образующихся за счет растворения карбонатных пород (мк, мм, м), соответствующие этим интервалам.



**Рис. 1.** Качественная картина зависимости размеров карстовых полостей в карбонатных породах (известняк, доломит) от времени

На оси времени выделены три интервала – зарождение полости (период до 3-5 тыс. лет), когда ее размер, в начале измеряемый микронами, достигает значений 5...10 мм; увеличение (от 3...5 тыс. до 10...100 тыс. лет), когда размер полости вырастает от первых миллиметров до 3...5 м; деградация (10...100 тыс. до 1-10 млн лет), когда полость или обрушается, или превращается в каньон либо пещеру. Этот график, конечно, носит качественный, описательный характер, и условия на каждой конкретной территории надо рассматривать отдельно. Но, во всяком случае, из него видно, что полость с диаметром около 6...8 м и намного более (а такие значения обычно получаются при расчетах по модели «равновесия» [9-12 и др.]) может образоваться в известняках лишь за период, на порядок превосходящий стандартный срок возводимых в Москве сооружений (около 100 лет).

Рассмотрим пример площадки с вполне типовыми для условий Москвы исходными данными. Сооружение опирается на фундаментную плиту, возводимую в котловане глубиной до 12 м. Давление на основание составляет около 340 кПа. В качестве описания инженерно-геологических условий приведем в табл. 3 «колонку» по одной из скважин, выбранной в качестве примера из соображений, что она характеризуется минимальным (из всех выполненных на площадке 13 скважин) значением суммарной мощности слоев глинистых грунтов (ИГЭ-5, ИГЭ-7) перекрывающих слой потенциально карстующегося известняка (ИГЭ-9).

Таблица 3

## Описание горной выработки (скважина №4)

№ ИГЭ	Мощность слоя, м	Описание грунта	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\varphi$ , °	$c$ , кПа	$e$	IND
3	4,55	Песок мелкий, средней плотности, водонасыщенный	1,94	28	3	0,68	1
4	1,80	Песок мелкий, плотный, влажный	1,95	34	4	0,56	1
2	1,30	Песок пылеватый, плотный, водонасыщенный	2,03	34	6	0,58	1
4	0,50	Песок мелкий, плотный, влажный	1,95	34	4	0,56	1
5	2,20	Суглинок полутвердый	2,22	26	58	0,37	3
7	0,80	Суглинок тугопластичный	2,07	30	39	0,53	3

Примем «в запас» предположение о реализации практически невозможной ситуации, что за время эксплуатации сооружения под фундаментом в известняке образовалась полость с диаметром в плане около 3 м. Такой размер предполагаемой полости теоретически достаточен для того, чтобы в нее мог бы «провалиться» на глубину этой полости столб грунта с размерами в плане  $D \leq 3$  м. Теперь покажем, что даже в случае образования такой «невероятно большой» (для рассматриваемых условий) полости грунтовые условия на данной площадке таковы, что грунт в эту полость не будет «проваливаться».

Чтобы не делать лишние упрощающие предположения, расчеты далее выполняются не по осредненным по всей высоте выделенного объема значениям грунтовых характеристик, а с учетом их значений в каждом слагающем его слое.

Покажем порядок расчетов на примере скважины №4, рассмотренной выше. Исходные данные для расчетов применительно к условиям каждой скважины записаны сначала в таблицах приведенного выше вида. Затем для каждой скважины текстовые таблицы представлялись в формате, подготовленном для выполнения расчетов на ЭВМ с использованием программного комплекса MATHCAD. Такая исходная таблица-матрица выглядит так, как показано в табл. 4.

В первом столбце матрицы записываются значения толщин слоев  $h_p$ , м, во втором – удельного веса грунта  $\gamma_p$ , кН/м<sup>3</sup>, в третьем – сцепления  $c$ , кПа, и в четвертом – угла внутреннего трения  $\varphi$ , град. Кроме того, в память вводится отдельный столбец, в котором записаны следующие данные (сверху вниз: отметка устья скважины, уровень подземных вод и отметка водоупора надюрского водоносного горизонта, отметка дна котлована, глубина котлована относительно отметки устья и давление (кПа) под подошвой плиты в зоне расположения скважины.

Таблица 4

## Матрица ввода исходных данных при расчете в программе MATHCAD

4,55	1,94	2,00	28,00	0,68	1	145,55
1,80	1,95	4,00	33,00	0,56	1	141,05
1,30	2,03	5,00	34,00	0,58	1	128,75
0,50	1,95	4,00	33,00	0,56	1	136,9
2,20	2,22	56,00	25,00	0,37	3	8,65
0,80	2,07	37,00	29,00	0,53	3	340

Высота цилиндрического объема грунта равна сумме мощностей слоев грунта между кровлей потенциально карстующихся пород и поверхностью или, в нашем случае, – подошвой плитного фундамента:

$$H = \sum_{i=1}^M h_i, \quad (4)$$

где  $i = 1 \dots M$ ,  $M$  – число выделенных в пределах указанного участка толщи слоев грунта;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя.

Приведем в несколько преобразованном виде, приспособленном для выполнения расчетов, известные соотношения, необходимые для оценки возможности «сдвига» указанного грунтового цилиндра.

Сдвигающее усилие  $T$ , действующее на выделенный объем грунта радиусом  $r$ , вес грунта в пределах указанного объема  $G(r)$  и нагрузка, приложенная сверху от давления под подошвой фундамента  $F(r)$ :

$$T(r) = F(r) + G(r): F(r) = \pi r^2 p_s \quad G(r) = \pi r^2 \sum_{i=1}^M \gamma_i h_i \quad (5)$$

Удерживающие силы  $N(z)$  – силы сцепления и трения, возникающего на боковой поверхности цилиндра за счет горизонтального давления  $\sigma_r(z)$  на нее, определяются в следующей очередности:

- вертикальное напряжение  $p_j$  на  $j$ -й поверхности ( $j = 1 \dots M + 1$  – номера горизонтальных поверхностей, включая верх «цилиндра» и его нижнюю поверхность, совпадающую с кровлей потенциально карстующегося массива,

$$p_j = p_s, \text{ если } j = 1, \text{ и } p_j = (p_s + \sum_{i=1}^{j-1} h_i \gamma_i), \text{ если } j > 1; \quad (6)$$

- боковое давление на поверхности цилиндра в пределах  $i$ -го слоя

$$\sigma_{gi} = 0,5(p_i + p_{i+1})m_i = 0,5(p_i + p_{i+1})(\text{tg}(45 - 0,5 \times \varphi_i))^2; \quad (7)$$

- суммарная удерживающая сила вследствие трения за счет бокового давления

$$N_g(r) = 2 \pi \times r \times \sum_{i=1}^M h_i \sigma_{gi} \text{tg}(\varphi_i); \quad (8)$$

- суммарная удерживающая сила вследствие сцепления

$$N_c(r) = 2 \pi \times r \times \sum_{i=1}^M h_i c_i. \quad (9)$$

В результате имеем

$$N(r) = N_g(r) + N_c(r) = 2 \pi \times r \times \sum_{i=1}^M h_i (\sigma_{gi} \text{tg}(\varphi_i) + c_i). \quad (10)$$

При указанных исходных данных значение  $D = 3$  м,  $p_s = 340$  кПа) получаем в результате расчетов:

$$T = 3961 \text{ кН}, N_g = 8989 \text{ кН}, N_c = 1674 \text{ кН}, N = 10066 \text{ кН}.$$

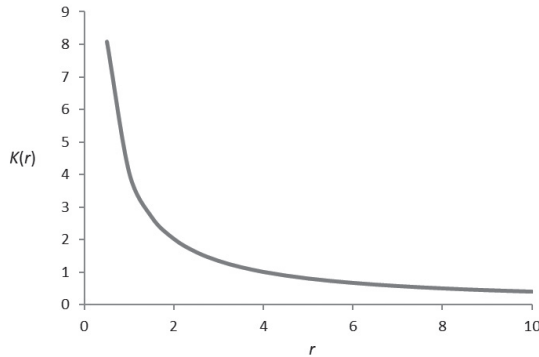
Значение коэффициента устойчивости выделенного объема

$$K(r) = N(r)/T(r) = \frac{2[\sum_{i=1}^M h_i (\sigma_{gi} \text{tg}(\varphi_i) + c_i)]}{r \sum_{i=1}^M \gamma_i h_i} \quad (11)$$

при  $r = 1,5$  м оказывается равным 2,7. Близкие (но несколько большие) значения коэффициента запаса получаются и в расчетах, выполненных для условий других выполненных на площадке скважин и значения  $r = 1,5$  м.



Приведем теперь на рис. 2 график зависимости  $K(r)$  для рассмотренных условий. Величине  $K(r) = 1$  соответствует значение  $R_{кр} = 4,04$  м, вполне «вписывающееся» в диапазон обычно определяемых по различным методикам значений  $R_{кр}$  при данной мощности надкарстовой толщи.



**Рис. 2.** Пример зависимости коэффициента устойчивости объема грунта над карстовой полостью от ее радиуса

Таким образом, коэффициент запаса  $Q/T$  при максимальном, прогнозируемом «с запасом», значении диаметра ( $D = 3$  м) полости в карстующемся массиве, составляет более  $2,7 \dots 3$ , т. е. возможность образования «провала» в рассматриваемых условиях исключена.

С практической точки зрения этот результат позволяет сделать вывод об отсутствии опасности проявлений карстово-суффозионных процессов на период времени, на порядок больший, чем расчетный срок эксплуатации сооружения, и, тем самым, позволяет отказаться от необходимости выполнения противокарстовых мероприятий в контуре проектируемого устройства плитного фундамента.

Теперь отметим еще одно важное продвижение методики оценки карстовой опасности в соответствии с рекомендациями [6], по сравнению с принятыми до настоящего времени схемами [9-11 и др.]. Как уже отмечено ранее, в рамках этих схем прогнозируемый диаметр провала или размер свода зависят только от строения и свойств грунтов некарстовой толщи, так как в расчете не учитываются свойства пород карстующегося массива. Но если для карбонатных пород Московского региона за период эксплуатации сооружения рост размеров возможной полости реально лежит в диапазоне до 1 м, и лишь с очень большим запасом принят нами равным 3 м, то в условиях районов распространения сульфатного карста эту величину следовало бы принимать  $15 \dots 20$  м. Но «диаметр провала», прогнозируемый (для одной и той же надкарстовой толщи) по указанным, обычно используемым схемам, при этом будет одинаковым. И если в первом случае (карбонатный карст и малый размер полости в карстующемся массиве) в принципе достаточно описанного выше «редуцированного» инженерного анализа, то при больших размерах полостей следует выполнять анализ механических процессов в толще грунтов с использованием современных программных средств для геомеханических расчетов или, на первых этапах, с привлечением более широкого набора средств инженерного анализа [12, 15, 16].

### Заключение

Суммируя приведенные выше факты, следует отметить, что предписанное разделение действующих нормативных документов и рекомендаций по инженерно-геологическим изысканиям и проектированию оснований и фундаментов, относящимися к прогнозу параметров карстово-суффозионных процессов на площадках проектируемого строительства, определение «интенсивности провалообразования» практически невыполнимо, а принятые схемы «определения диаметра карстового провала», учитывающие только свойства грунтов в надкарстовой толще и не принимающие во внимание различие процессов карстообразования в породах с различной растворимостью, – неинформативны и не дает возможности оценить реальные параметры карстообразования.

Для условий распространения карбонатных карстующихся пород Московского региона размер полости, образующейся за обычный расчетный срок эксплуатации сооружения, ограничен величинами 1...3 м. Определение коэффициента устойчивости выделенного столба в грунтовом массиве с диаметром, изменяющимся в этом диапазоне, показывает, что значения этого коэффициента в большинстве реальных условий оказываются превышающими 2,5...3. Такой результат для многих площадок, первоначально идентифицируемых как «потенциально опасные», позволяет обоснованно перевести их в категорию «неопасных» по фактору карстово-суффозионной опасности.

### Библиографический список

1. СП 11-105-97. Инженерные изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
2. Инженерно-геологические изыскания в районах развития карста. НИИИС Госстроя России. М., 2001.
3. Москва. Геология и город. Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева. РАН, Институт геоэкологии, Мосгоргеотрест, М., 1997.
4. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. – НИИОСП. М., 1985.
5. Инструкция по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве. М.: Москомархитектура, 2004.
6. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
7. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: Мосгорисполком, 1984.
8. *Зверев В.П., Костикова И.А.* Об интенсивности развития карбонатного карста // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. №5. С. 13-18.
9. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989.

10. Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990.
11. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986.
12. Аникеев А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска // РАН, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева. М., 2017.
13. Кочев А. Д., Чертков Л. Г., Зайонц И. Л. Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности // Инженерная геология. 2018;13 (6):24-32.
14. Ковалев В. А., Патрикеев А. Б. О расчете параметров карстового провала // ПГС. 2016, №10. С. 36-41.
15. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003.
16. Шейнин В. И. К использованию модели мульды оседания для прогноза влияния карстовой полости на деформации грунтового массива // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. №4. С. 13-19.
17. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Springer Praxis, 2005.

## Авторы:

Владимир Александрович КОВАЛЁВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Естественных оснований и конструкций», НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir KOVALEV, Ph. D. in Engineering, Head of Department «The Natural Foundations and Constructions», NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: vladimir@olimproekt.ru

Антон Борисович ПАТРИКЕЕВ, инженер, лаборатория «Естественных оснований и конструкций», НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва  
Anton PATRIKEEV, engineer, Department «The Natural Foundations and Constructions», NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: patrikeev@olimproekt.ru

Владимир Исаакович ШЕЙНИН, д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Геомеханики подземных сооружений», НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir SHEYNIN, Doctor of Engineering, Head of Department «Geomechanics of Underground Structures», NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: geo-mech@yandex.ru