



УДК 551.435.8

М. М. УТКИН, канд. техн. наук, главный специалист карстологических исследований

К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОУПОРА НАД КАРСТОВОЙ ПОЛОСТЬЮ

АО «Гео Палитра»

Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Костина, д. 3, пом. П53.

Тел.: +7 (920) 252-22-69; эл. почта: geokarst@mail.ru

Ключевые слова: карст, карстовая полость, коэффициент запаса устойчивости, устойчивость водоупора, карстовый провал.

При наличии в разрезе водоупорной толщи оценка карстовой (в том числе карстово-суффозионной) опасности, как правило, сопряжена с оценкой устойчивости водоупора над карстовой полостью. Ее предложено производить исходя из сравнения расчетного коэффициента устойчивости с коэффициентом запаса устойчивости. Определение последнего предложено выполнять главным образом в зависимости от уровня ответственности (класса) сооружения и категории карстово-суффозионной (карстовой) опасности участка (площадки). На конкретном практическом примере рассмотрено выполнение оценки устойчивости глинистого водоупора над полостью.

Методика оценки карстовой опасности, изложенная в действующих нормативных документах по проектированию зданий и сооружений на закарстованных территориях [1, 2], заключается в следующем. Сначала определяется диаметр (пролет) карстовой полости на момент окончания расчетного срока службы сооружения $2a$. Затем его необходимо сравнить с минимальным диаметром (пролетом) полости d_{\min} , при котором карстовое провалообразование возможно в принципе. Если окажется что $2a > d_{\min}$, то возникновение провала не исключается, в противном случае ($2a < d_{\min}$) – не представляется возможным. Строгое соблюдение указанного неравенства противоречит не только сложившейся практике геотехнических расчетов устойчивости, которые выполняются, как правило, с учетом коэффициента запаса устойчивости (обычно изменяется от 1,1 до 1,4 [2, 3]), но и главным образом методу предельных состояний, на котором так или иначе базируются отечественные нормативные документы по инженерно-геологическим изысканиям и проектированию.

Выходом из сложившейся ситуации является использование при оценке устойчивости водоупора над карстовой полостью коэффициента запаса. К сожалению, в нормативных документах по оценке карстовой опасности [1-4] о подобном коэффициенте, как правило, не упоминается. Исключением из правила можно считать п. 6.3.12 СП [2], в котором, применительно к объему геотехнических мероприятий, отмечается, что высота свода обрушения грунтов H_{ce} не должна превышать высоты зоны их закрепления H с коэффициентом запаса равным 1,4 ($H \geq 1,4H_{ce}$). Указанное значение коэффициента может быть принято в качестве определенного ориентира.



Исходя из всего вышеизложенного, в настоящей работе предложен и затем применен на практике способ определения коэффициента запаса устойчивости водоупора над карстовой полостью. При его разработке по возможности в максимальной степени учитывались все основные положения, используемые при вычислении нормированного коэффициента устойчивости для склонов и откосов [3]. Далее рассмотрим эти положения подробно.

В соответствии с СП 116.13330.2012 [3] расчеты устойчивости склонов и откосов выполняются согласно следующей зависимости

$$k_{st} \geq [k_{st}], \quad (1)$$

где k_{st} – расчетное значение коэффициента устойчивости, а $[k_{st}]$ – нормированное его значение. Применительно для склонов и откосов оно определяется по формуле

$$[k_{st}] = \gamma_n \psi / \gamma_d, \quad (2)$$

где γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый для сооружений нормального и повышенного уровней ответственности равным 1,15 и 1,20 соответственно;

ψ – коэффициент условий работы, назначаемый в зависимости от группы предельных состояний, по которой выполняются расчеты. Так, при выполнении расчетов по предельным состояниям первой группы на особое сочетание нагрузок рассматриваемый коэффициент принимается равным 0,95;

γ_d – коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы; устанавливается в диапазоне $0,75 \leq \gamma_d \leq 1,00$ нормами проектирования отдельных видов сооружений. К сожалению, в нормативных документах по проектированию сооружений на закарстованных территориях данный коэффициент не рассматривается.

Применительно к задаче оценки устойчивости водоупора над карстовой полостью, из трех вышеприведенных коэффициентов только последний использовать не представляется возможным. Поэтому его предлагается исключить, а в числитель выражения (2) добавить коэффициент степени карстовой опасности γ_{kr} . Следовательно, формула (2) запишется следующим образом:

$$[k_{st}] = \gamma_n \psi \gamma_{kr}. \quad (3)$$

При оценке карстово-суффозионной опасности [1] коэффициент γ_{kr} для потенциально опасной и неопасной категорий предлагается принять равным 1,2, а для опасной категории – 1,3. В случае выполнения оценки карстовой опасности [4] рассматриваемый коэффициент для IV-VI категорий опасности по интенсивности провалообразования предлагается принять равным 1,2, а для I-III категорий опасности – 1,3.



Значения коэффициента запаса устойчивости $[k_{st}]$, вычисленные по формуле (3) для различных расчетных случаев и округленные до десятых единиц, сведены в таблицу 1. Как видно из таблицы значения $[k_{st}]$ изменяются от 1,3 до 1,5.

Таблица 1

Значения коэффициента запаса устойчивости водоупора над карстовой полостью

Уровень ответственности (класс) сооружения	Коэффициент запаса устойчивости водоупора $[k_{st}]$	
	Категория карстово-суффозионной (карстовой) опасности	
	Потенциально опасная, неопасная (IV-VI)	Опасная (I-III)
Нормальный (КС-2)	1,3	1,4
Повышенный (КС-3)	1,4	1,5

Применение вышеизложенного подхода возможно только лишь при хорошей изученности инженерно-геологических условий в основании сооружений. Принимая во внимание большое многообразие как инженерно-геологических условий участков (площадок), так и конструктивных решений сооружений оценка изученности должна выполняться экспертным путем, с учетом требований нормативных документов в области карста.

Предложенный подход по оценке устойчивости водоупора успешно применен на одном из линейных объектов, расположенном на севере Москвы, в районе ст. Ховрино. Проектируемый объект представляет из себя железнодорожный путепровод на 21 опоре (№ 0-20).

Для участка расположения наиболее нагруженных опор путепровода (№ 17, 18) кратко охарактеризуем геолого-гидрогеологические условия. Они показаны на рис. 1.

В геологическом строении участка принимают участие четвертичные отложения, перекрывающие коренные породы меловой, юрской и каменноугольной систем.

Четвертичные отложения представлены (сверху вниз) современными техногенными образованиями (*tIV*; ИГЭ *1в2*, *1ж2*), среднетчетвичными ледниковыми отложениями московской морены (*gIIms*; ИГЭ *12ж2*, *12ж3*) и главным образом ниже-среднетчетвичными отложениями донского-московского оледенений (*f,lgIdns-IIms*; ИГЭ *14а3*, *14в2*). Четвертичная толща сложена, как правило, различными песками и суглинками.

На дочетвертичную поверхность выходят неразделенные верхнеюрские-нижнемеловые отложения (*J3-K1*; ИГЭ *20бБ2*, *20ж2*, *20ж3*, *20е2*, *20з2Н*), представленные мелким плотным песком, полутвердым и тугопластичным суглинком, пылеватой пластичной супесью и полутвердой глиной. Толща верхнеюрских-нижнемеловых пород перекрывает верхнеюрские отложения оксфордского яруса (*J3о*; ИГЭ *21з1Н*), сложенные твердой глиной.

Ниже по разрезу залегают верхнекаменноугольные отложения (*C3*; ИГЭ *24з1Н*, *24ч2*, *24ч3*), представленные твердой глиной и главным образом прочным и средней прочности трещиноватым известняком, участками выветрелым и слабокавернозным.

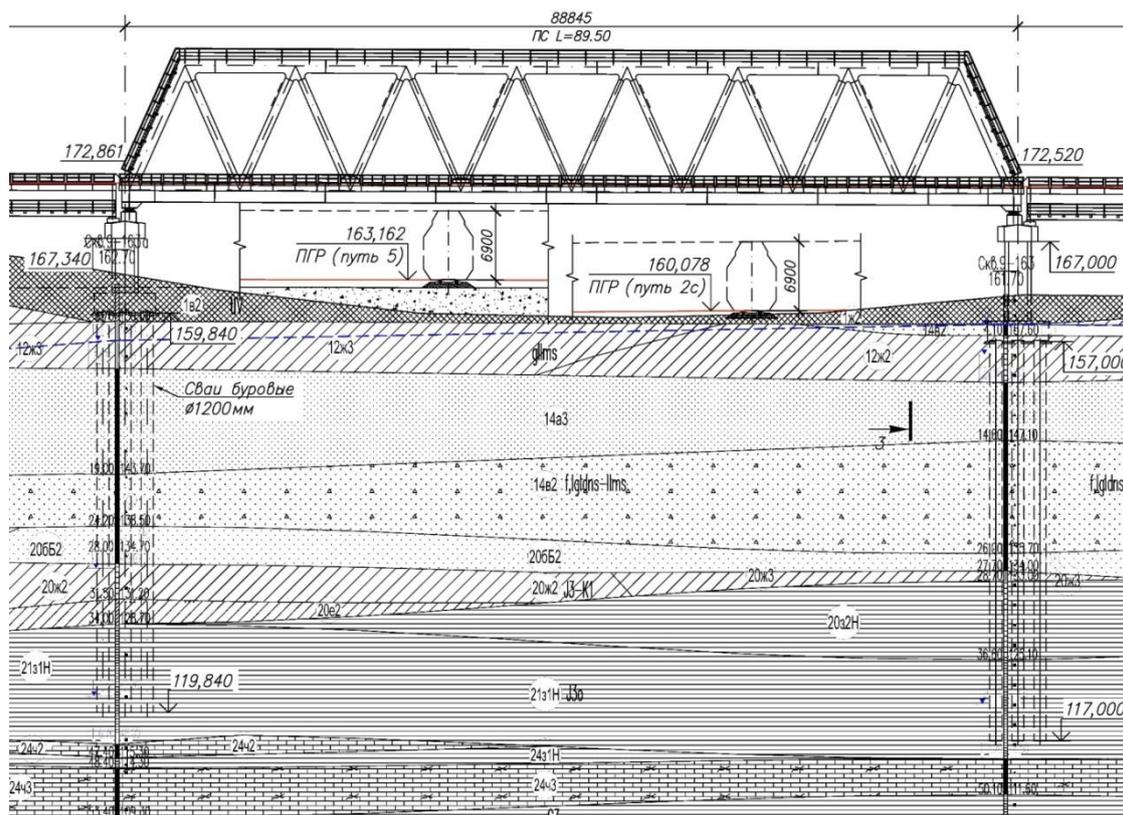


Рис. 1. Врезка фундаментов наиболее нагруженных опор путепровода (№ 17, 18) в инженерную геологию

Гидрогеологические условия участка определяются надюрским и верхнекаменноугольным водоносными комплексами.

Надюрский водоносный комплекс приурочен к ниже-среднечетвертичным (*f,lgIdns-IIms*) и верхнеюрским-нижнемеловым (*J3-K1*) отложениям. Водовмещающими породами являются пески различной крупности. Грунтовые воды безнапорные, загрязнены, характеризуются минерализацией 0,71-2,80 г/л. Нижним региональным водоупором служит толща юрских глин.

Водоносный верхнекаменноугольный комплекс (*C3*), именуемый также трещинно-карстовым водоносным горизонтом, приурочен к трещиноватым известнякам, разделенным невыдержанными по мощности прослоями относительно водоупорных глин. Подземные воды напорные, по химическому составу хлоридно-гидрокарбонатные, хлоридные натриево-кальциевые, натриевые, обладают минерализацией 0,74-3,80 г/л.

Таким образом, карст на исследуемом участке карбонатный, покрытый и глубокий. Важную роль играет коренной глинистый водоупор, который значительно затрудняет протекание процессов растворения и суффозии.

Поскольку сведений о поверхностных карстопроявлениях на участке строительства и в непосредственной близости от него не имеется, подземных карстопроявлений (в первую очередь полостей) не вскрыто, а мощность коренного глинистого водоупора превышает 10 м, то согласно региональным особенностям развитая карста [1], предметно изложенным в Инструкции



1984 г. [5], первоначально исследуемый участок отнесен к неопасной категории в карстово-суффозионном отношении.

Однако, вышеизложенная оценка карстоопасности не учитывает конструктивные решения проектируемого объекта, а именно тот факт, что буровые сваи опор путепровода заглубляются, как правило, в коренной глинистый водоупор. Причем нижние концы свай наиболее нагруженных опор располагаются вблизи кровли карстующейся толщи (см. рис. 1). Тем самым фактическая мощность водоупора уменьшается до 1,8-3,5 м. Принимая изложенное во внимание, а также большое давление под подошвой условных фундаментов (в уровне низа свай изменяется от 453,5 до 798,4 кПа, в среднем составляя 691,7 кПа) и требования нормативных документов [1, 2], была выполнена оценка устойчивости (надежности) коренного глинистого водоупора над гипотетической карстовой полостью. Так как объект относится к повышенному уровню ответственности, то коэффициент запаса устойчивости водоупора $[k_{st}]$ принят равным 1,4 (см. таблицу 1).

Оценка устойчивости глинистого водоупора выполнялась с помощью известных детерминистических геомеханических (аналитических) методов. Согласно результатам лабораторного физического моделирования [6, 7], в данном случае обрушение водоупора в полость может произойти (1) в ходе его среза по круглоцилиндрической поверхности или (2) в результате его внутреннего вывала. Для прогнозирования минимального диаметра полости d_{min} , при котором возможно обрушение водоупора, в первом случае использовались методы д-ра техн. наук, проф. Г. М. Шахунянца и инж. Г. М. Троицкого, во втором случае – метод проф. М. М. Протодьяконова. В настоящее время все три метода изложены в СП [2]. Здесь отметим, что Г. М. Шахунянец не ставил перед собой цель разработать геомеханический метод, им было выведено только уравнение равновесия сдвигающих и удерживающих сил [8], решение которого относительно диаметра провала (полости) выполнил один из его учеников – канд. техн. наук, проф. В. В. Толмачев [6]. Об этом упоминалось в одной из статей автора [9].

Расчетное значение коэффициента устойчивости водоупора k_{st} вычислялось по формуле

$$k_{st} = \frac{d_{min}}{2a}. \quad (4)$$

Все прогностические расчеты произведены в программном комплексе (ПК) «Karst diameter» [10]. Данный ПК в первую очередь является научно-исследовательским, который позволяет выполнять расчеты диаметров провалов и воронок, пролетов (диаметров) полостей с применением более чем 25 геомеханических методов. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.



Таблица 2

Результаты прогностических расчетов карстовой опасности в основании проектируемого объекта

Наименование сооружения	№ опоры	Фактическая мощность коренного глинистого водоупора, м	Максимальный прогнозный диаметр провалов, $d_{max,p}$, м, или минимальный прогнозный диаметр полостей, d_{min} , м			Расчетный минимальный коэффициент устойчивости водоупора, $k_{st,min} > [k_{st}]$	Принятые диаметры провалов	
			Метод Г.М. Шахунянца	Метод Г.М. Троицкого	Метод М.М. Протогдыконова		Максимальный, d_{max} , м	Средний, d_{cp} , м
Путе-провод на ст. Ховрино	0	11,0	6,0	7,7	9,8	6,00 > 1,4	–	–
	1	10,8	4,7	6,1	7,5	4,68 > 1,4	–	–
	2	11,8	5,3	6,4	7,1	5,35 > 1,4	–	–
	3	10,5	3,7	4,5	7,2	3,67 > 1,4	–	–
	4	11,18	3,7	4,7	6,2	3,71 > 1,4	–	–
	5	10,35	3,4	4,6	7,3	3,44 > 1,4	–	–
	6	7,44	2,3	3,3	6,5	2,35 > 1,4	–	–
	7	5,92	2,0	2,6	4,7	1,96 > 1,4	–	–
	8	5,51	2,0	2,5	4,1	2,01 > 1,4	–	–
	9	3,46	1,1	1,6	2,6	1,11 < 1,4	1,1	0,6
	10	5,82	2,3	2,9	4,6	2,33 > 1,4	–	–
	11	7,21	3,0	3,7	5,9	3,05 > 1,4	–	–
	12	8,63	3,6	4,3	7,0	3,61 > 1,4	–	–
	13	6,82	2,8	3,4	5,5	2,78 > 1,4	–	–
	14	6,96	2,6	3,2	5,2	2,62 > 1,4	–	–
	15	7,75	2,9	3,5	5,8	2,93 > 1,4	–	–
	16	7,88	3,4	3,6	5,1	3,37 > 1,4	–	–
	17	3,14	1,1	1,5	2,0	1,11 < 1,4	1,1	0,6
	18	1,8	0,6	0,8	1,1	0,64 < 1,4	1,1	0,6
	19	15,48	5,1	6,5	11,3	5,13 > 1,4	–	–
20	18,34	7,1	8,9	14,2	7,07 > 1,4	–	–	

Исходя из результатов прогностических расчетов (см. таблицу 2) сделан вывод, что опасность возникновения карстовых провалов имеется в основании только тех опор, где мощность коренного глинистого водоупора составляет около 3 м и менее. Данные опоры было рекомендовано рассчитать на прочность и устойчивость [1-3] при воздействии на них максимального диаметра карстового провала d_{max} . Следовательно, участки расположения этих опор отнесены к потенциально опасной категории в карстово-суффозионном отношении [1] и к V категории карстоопасности по интенсивности провалообразования ($\lambda = 0,01$ пров./год·км²) [4]. Участки размещения всех остальных опор можно считать неопасными в карстово-суффозионном и карстовом отношениях.



В качестве **заключительного вывода** отметим, что при необходимости рассматриваемый подход к оценке устойчивости водоупора над карстовой полостью может быть распространен на грунты всей покровной толщи. Как и в текущем случае, для этого потребуется детальное рассмотрение вероятного механизма карстового провалообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : свод правил : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр : актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : [с изменениями №1, 2, 3, 4, 5]. – Москва : Минстрой России, 2021. – Текст : непосредственный.

2. СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования : свод правил : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 02 марта 2021 г. № 105/пр : дата введения 03 сентября 2021 г. – Москва : Минстрой России, 2021. – Текст : непосредственный.

3. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : свод правил : утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. N 27 : актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 : [с изменениями №1, 2] : дата введения 01 января 2013 г. – Москва : Минрегион России, 2020. – Текст : непосредственный.

4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов : свод правил : одобрен Письмом Управления научно-технических и проектно-изыскательских работ Госстроя РФ от 25 сентября 2000 г. N 5-11/88. – Москва : Госстрой России, 2003. – Текст : непосредственный.

5. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. – Москва : Мосгорисполком, ГлавАПУ, Моспроект-1, Мосгоргеотрест, 1984. – 14 с. – Текст : непосредственный.

6. Толмачев, В. В. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / В. В. Толмачев, Г. М. Троицкий, В. П. Хоменко ; под ред. Е. А. Сорочана. – Москва : Стройиздат, 1986. – 176 с. – Текст : непосредственный.

7. Хоменко, В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов : монография / В. П. Хоменко. – Москва : ГЕОС, 2003. – 216 с. – ISBN 5-89118-320-X. – Текст : непосредственный.

8. Шахуняц, Г. М. Земляное полотно железных дорог : вопросы проектирования и расчета : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Г. М. Шахуняц. – Москва : Трансжелдориздат, 1953. – 828 с. – Текст : непосредственный.

9. Уткин, М. М. Определение диаметра карстового провала по геомеханическому методу Г. М. Шахуняца с учетом внешней нагрузки в зоне провала / М. М. Уткин. – Текст : непосредственный. // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – № 4. – С. 84–91.

10. Свидетельство о Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017614985. Программный комплекс по определению расчетного диаметра карстового провала и воронки с использованием детерминистических геомеханических методов (Karst diameter) : № 2017610643 : заявл. 25.01.2017 : опубл. 02.05.2017 / М. М. Уткин. – Москва : Роспатент. – 2017. – 1 с. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39363986_62033669.PDF. – Текст : электронный.



UTKIN Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, chief specialist of karstological research

TO THE STABILITY ANALYSIS OF THE AQUICTOR ABOVE THE KARST CAVITY

JSC "Geo Palitra"

3, Kostina St., off. P53, Nizhny Novgorod, 603000, Russia.

Tel.: +7 (920) 252-22-69; e-mail: geokarst@mail.ru

Key words: karst, karst cavity, stability coefficient, aquiclude's stability, sinkhole.

In the presence of an aquiclude in the geological section, the assessment of karst-suffusion (or karst) hazard is usually associated with the assessment of the stability of the aquiclude above the karst cavity. It is proposed to perform it based on a comparison of the calculated stability coefficient with the stability coefficient. It is proposed to determine the latter depending on the level of responsibility (class) of the structure and the category of karst-suffusion (or karst) hazard of the site. This article examines the assessment of the stability of a clay aquiclude above a cavity using a specific practical example.

REFERENCES

1. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Soil bases of buildings and structures]. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.02.01-83* (s Izmeneniyami № 1, 2, 3, 4, 5). Moscow, Minregion Rossii, 2021.
2. SP 499.1325800.2021. Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot karstovo-suffuzionnykh processov [Engineering protection of territories, buildings and structures from karst-suffusion processes]: svod pravil : utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva RF ot 02 marta 2021 g. № 105/pr : data vved. 03-09-2021. Moscow, Minstroy Rossii, 2021.
3. SP 116.13330.2012. Inzhenernaya zashchita territorii, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh processov [Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes]. Osnovnye polozheniya : svod pravil : utverzhden Prikazom Ministerstva regionalnogo razvitiya RF ot 30-06-2012 N 27. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 22-02-2003 (s Izmeneniyami № 1, 2). Moscow, Minregion Rossii, 2020.
4. SP 11-105-97. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Chast II. Pravila proizvodstva rabot v rajonah razvitiya opasnykh 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] svod pravil : odobren Pismom Upravleniya nauchno-tekhnicheskikh i proektno-izyskatelskikh rabot Gosstroya RF ot 25-09-2000 N 5-11/88. Moscow, Gosstroy Rossii, 2003.
5. Instrukciya po proektirovaniyu zdaniy i sooruzheniy v rayonakh g. Moskvy s proyavleniem karstovo-suffuzionnykh processov [Instructions for the design of buildings and structures in areas of Moscow with manifestation of karst-suffusion processes]. Moscow, Mosgorispolkom, GlavAPU, Mosproekt-1, Mosgorgestrest, 1984.
6. Tolmachev V. V., Troitskiy, G. M., Homenko, V. P. Inzhenerno-stroitelnoe osvoenie zakarstovannykh territoriy [Geotechnical reclamation of karst area]. Moscow, Stroyizdat, 1986, 176 p.
7. Homenko V. P. Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh processov [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS, 2003, 216 p.



8. Shakhunyants G. M. Zemlyano polотно zheleznykh dorog: voprosy proektirovaniyai raschyota [Roadbed of railways: Design and Calculation Issue]: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta. Moscow, Transzheldorizdat, 1953, 828 p.

9. Utkin M. M. Opredelenie diametra karstovogo provala po geomekhanicheskomu metodu G. M. Shakhunyantsa s uchetom vneshney nagruzki v zone provala [Determination of karst collapse diameter by G. M. Shakhunyants geomechanic method with allowance for external loading in area adjacent to karst collapse]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. 2020, № 4. P. 84-91.

10. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Programmny kompleks po opredeleniyu raschyotnogo diametra karstovogo provala i voronki s ispolzovaniem deterministicheskikh geomekhanicheskikh metodov (Karst diameter) [Certificate on the state registration of the computer software. Software complex for determination of calculated diameter of a karst collapse and sink using deterministic geomechanic methods (Karst diameter)]. № 2017610643 : zayavl. 25.01.2017 : opubl. 02.05.2017. M. M. Utkin. Moscow, Rospatent, 2017, 1 p. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39363986_62033669.PDF.

© М. М. Уткин, 2025

Получено: 13.12.2024 г.