

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ТЕРРИТОРИИ г. КУНГУР И ИХ ВЛИЯНИЕ НА АКТИВНОСТЬ КАРСТА**

*The relationship between karst forms and the basic mechanical characteristics of Quaternary disperse soils on territory of Kungur city (Permsky krai) is analysed. The study is carried out in two directions: frequency of karst forms occurrence and parameters of their morphometry depending on values of mechanical properties of soils is estimated.*

В современном инженерном карстоведении задачи, связанные с поиском зависимостей между физико-механическими характеристиками грунтов, перекрывающих карстующиеся породы, и особенностями развития карстовых форм в пространстве практически не рассматриваются. Еще в большей степени это касается задач оценки средних морфометрических характеристик карстовых форм в зависимости от свойств грунтов перекрывающей толщи. Данные обстоятельства объясняются многими причинами, главная из которых заключается в отсутствии обобщения материалов комплексных многолетних инженерно-геологических и карстологических исследований в количествах, достаточных для выявления статистических зависимостей в пределах территории исследования. Во многих случаях, при относительно представительной инженерно-геологической изученности территории карстологические исследования в ее пределах практически не проводились. Примеры обратной картины, когда имеются карстологические сведения, но нет данных инженерно-геологических изысканий встречаются очень часто. В непосредственной близости от многих населенных пунктов и в пределах крупных промышленных объектов развиты и изучены многочисленные карстовые поля, имеются данные разновременных карстологических съемок. Но при этом на данных территориях исследования с применением буровых работ или иных методов, позволяющих получить сведения о строении и свойствах грунтов, не проводились. Наконец, в тех редких случаях, когда инженерно-геологическая и карстологическая информация по какому-либо объекту имеется в достаточном количестве, зачастую возникают трудности с ее сбором и первичной систематизацией.

Территория г. Кунгур в отношении комплексной инженерно-карстологической изученности выгодно отличается от иных территорий градопромышленных агломераций Пермского края. Изучение условий развития карста и систематический карстомониторинг здесь ведется с начала 1950-х гг. За последние 50 лет на территории города инженерно-геологические изыскания выполнялись многими организациями, в результате

которых к настоящему времени пробурено свыше 4000 инженерно-геологических горных выработок, отобрано и обработано более 5000 проб грунтов. В 2004 г. Кунгурской лабораторией-стационаром данные инженерно-геологических изысканий в пределах городской территории были систематизированы и сведены в единую базу данных с общей привязкой (Пятунин, 2007).

Первые попытки установить закономерности между свойствами грунтов перекрывающей толщи и распространением карстовых форм на территории г. Кунгур были осуществлены авторами еще в 2008 г. (Щербаков, 2010а). Для этого анализировались два физических показателя – плотность грунтов при природном сложении и коэффициент пористости. Все множество наиболее часто встречающихся на территории города грунтов было разделено на группы и подгруппы в зависимости от их литологического типа и состояния (супесь твердая, песок мелкий и т.д.). В результате такого анализа было установлено, что распространение карстовых форм тяготеет к средним значениям обоих свойств и в большинстве случаев достаточно точно описывается нормальным законом распределения. Позже, результаты этих исследований были использованы при построении интегральной модели карстоопасности территории города (Щербаков, Катаев, 2011).

Среди недостатков проведенного ранее анализа можно отметить отказ от рассмотрения характеристик механических свойств грунтов, в виду относительно слабой изученности грунтов города сдвиговыми и компрессионными испытаниями. Однако именно механические свойства перекрывающей дисперсной толщи являются основными показателями, характеризующими состояние грунтов и их поведение под действием нагрузок. Механические показатели используются во всех детерминистических расчетных моделях по определению устойчивости грунтовой толщи в кровле полости. Наконец, по основным прочностным и деформационным характеристикам дисперсных грунтов можно косвенно судить об их составе, не прибегая к классификации с использованием качественных описательных характеристик (супесь, песок, суглинок и пр.). Например, с увеличением удельного сцепления увеличивается «глинистость» грунтов, а с ростом значений угла внутреннего трения повышается «песчанность». Низкие и близкие к нулю значения модуля общей деформации характерны для слабых органо-минеральных грунтов, в то время как высокие значения модуля характеризуют пески повышенной крупности.

Принимая во внимание выше сказанное, целью настоящих исследований является расширение и углубление представлений о взаимосвязях между свойствами грунтов и карстовыми формами, а также возможный пересмотр результатов исследований предыдущих лет. Ключевыми рассматриваемыми показателями выступают основные показатели механических свойств дисперсных грунтов в их естественном (природном) состоянии – модуль общей деформации  $E_0$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$ .

В виду слабой и неравномерной изученности грунтов на территории г. Кунгур сдвиговыми и компрессионными испытаниями, в настоящих

исследованиях помимо лабораторных значений механических характеристик также учитывались их табличные значения, определенные согласно приложению Г СП 50-101-2004 с использованием значений физических свойств грунтов и их номенклатуры. Табличные значения механических характеристик определены для каждой отдельно взятой пробы, характеризующейся полным набором физических характеристик. Всего проанализировано 2200 таких проб.

Точность оценки механических характеристик по таблицам СП 50-101-2004 определена путем сопоставления их значений с результатами прямых лабораторных испытаний двумя способами. Первый способ заключался в оценке корреляционных связей между данными показателями, полученными в результате анализа каждой пробы. Второй способ ориентирован на определение связи между табличными и лабораторными значениями механических свойств грунтов в пробах, отобранных при бурении скважин, в результате осреднения значений. Результаты корреляционного анализа приведены в таблице 1. Как видно, между значениями механических характеристик, определенных разными способами, наблюдается весьма устойчивая прямая корреляция, а после удаления из общей совокупности наиболее отклоняющихся пар значений связь между ними становится весьма тесной с коэффициентом линейной корреляции, превышающим 0,7 (рисунок 1). Наличие столь тесных связей позволило использовать табличные значения механических характеристик наравне с лабораторными в ходе карстологических исследований.

Применяемая методика оценки связи между значениями механических характеристик грунтов и распространением карстовых форм в пространстве, а также их морфометрическими показателями не нова и детально описана в ранее опубликованных работах авторов (Катаев, Щербаков и др., 2009; Щербаков, Катаев 2011). Она заключается в построении цифровых картографических моделей изменчивости исследуемых показателей в пространстве и сопоставлении этих моделей с развитыми на исследуемой территории карстовыми формами. Результат такого сопоставления выражается в графической форме в виде графиков частоты или частости встречаемости карстовых форм в пределах определенных интервалов значений исследуемых показателей. В данном случае картографические модели строились по *средним значениям* механических характеристик в скважинах. Среди карстовых форм анализировались как поверхностные (провалы и воронки), так и подземные проявления карста (полости, зоны дробления). Подробнее о зонах дробления, причинах их выделения в качестве самостоятельных обособленных проявлений карста и необходимости включения в общий анализ рассмотрено в работе С.В. Щербакова (2010б).

Помимо изучения пространственного распределения карстовых форм на фоне распределения показателей механических свойств грунтов в ходе исследований оценивались их морфометрические параметры. В случае провалов и воронок изучалась зависимость их средних диаметров  $d$  от

значений свойств грунтов, а в случае полостей и зон дробления – зависимости их вертикальных мощностей  $h_p$ ,  $h_z$ . Методика оценки зависимости между свойствами и морфометрией карстовых форм сводится к снятию значений свойств с цифровых моделей в точке расположения карстовой формы. Таким образом, в результате получается набор пар значений морфометрических параметров карстовых форм и соответствующих им значений изучаемых свойств грунтового массива, что дает возможность исследовать связи между этими показателями методами стандартного корреляционного анализа.

Таблица 1. Взаимосвязь лабораторных и табличных значений основных механических свойств дисперсных грунтов перекрывающих отложений на территории г. Кунгур

Свойство	Количество пар значений, шт.		Количество пар значений в выборке, %	Коэффициент линейной корреляции, д.е.
	в генеральной совокупности	в выборке		
1	2	3	4	5
<i>А. Оценка связи по пробам</i>				
Модуль общей деформации	1058	112	89,4	0,74
Угол внутреннего трения	1276	910	71,3	0,71
Удельное сцепление	1248	990	79,3	0,76
<i>Б. Оценка связи по средним значениям в скважинах</i>				
Модуль общей деформации	239	219	91,6	0,76
Угол внутреннего трения	407	271	66,6	0,72
Удельное сцепление	407	348	85,5	0,71

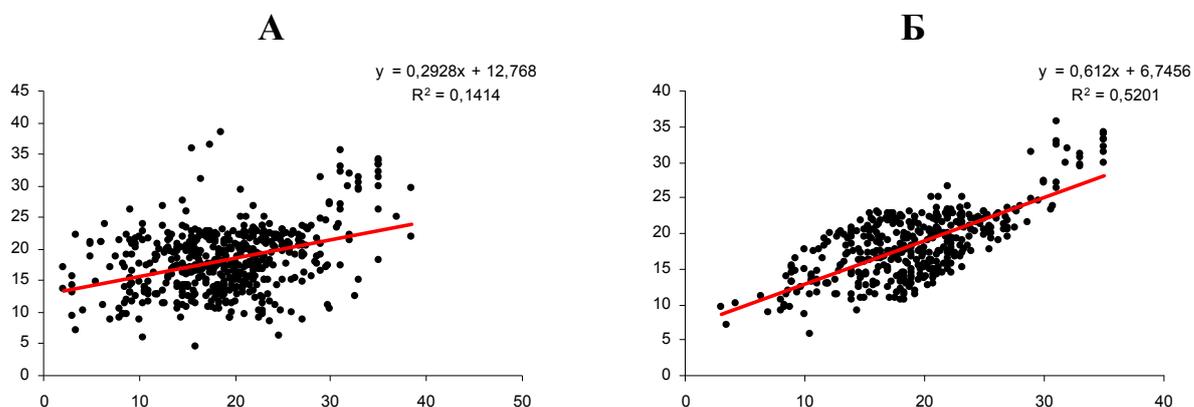


Рисунок 1. Пример зависимости табличных (ось Y) значений угла внутреннего трения (градус) от лабораторных (ось X): А – вся совокупность пар значений (генеральная); Б – совокупность после отсеивания наиболее отклоняющихся от тренда пар значений

С целью возможности разнопланового сопоставления и сравнения результатов все исследуемые показатели, как свойств грунтов, так и морфометрических параметров карстовых форм, приводятся к общему знаменателю. Для этого каждое частное значение характеристики делится на

ее территориальный максимум – максимальное значение в пределах всей исследуемой территории (таблица 2). Таким образом, получаются индексные оценки ( $I$ ) исследуемых показателей:

$$Ih_{pi} = \frac{h_{pi}}{\max h_p}, \quad Ih_{zi} = \frac{h_{zi}}{\max h_z}, \quad Id_i = \frac{d_i}{\max d},$$

$$IE_{0i} = \frac{E_{0i}}{\max E_0}, \quad I\varphi_i = \frac{\varphi_i}{\max \varphi}, \quad Ic_i = \frac{c_i}{\max c}$$

где  $I_i$  – индексная оценка  $i$ -го значения какого-либо показателя, д.е.

Преимущество использования индексных оценок заключается не только в возможности сравнивать разноразмерные показатели друг с другом, но и в том, что в результате такой операции новые значения каждого из показателей изменяются в одинаковых пределах – от 0 до 1. При этом чтобы получить истинные значения характеристик достаточно выполнить обратную операцию – умножить ее индексное значение на территориальный максимум.

Таблица 2. Территориальные максимумы характеристик механических свойств грунтов и морфометрических параметров карстовых форм в пределах г. Кунгур

Характеристика	$E_0$	$\varphi$	$c$	$d$	$h_p$	$h_z$
Единица измерения	МПа	°	кПа	м	м	м
Максимальное значение	30,7	35,1	65,5	35,7	17,8	13,8

В результате сопоставления исследуемых характеристик механических свойств грунтов и карстовых форм на территории г. Кунгур был установлен нормальный характер распределения последних. Характерной особенностью является практически полное совпадение распределений разных карстовых форм друг с другом (рисунок 2). Данное наблюдение полностью повторяет выводы, сделанные ранее при рассмотрении характеристик физических свойств грунтов (Щербаков, 2010а). Большая часть карстовых форм тяготеет к средним значениям модуля общей деформации и удельного сцепления с небольшой асимметрией в сторону больших значений. В случае угла внутреннего трения асимметрия в сторону больших значений несколько больше. В целом точность выражения наблюдаемых распределений нормальным законом достаточно высока, что позволяет прогнозировать вероятность появления новых карстовых форм по значениям механических свойств грунтов перекрывающих отложений (таблица 3).

Установить характер зависимости морфометрических параметров карстовых форм от значений механических характеристик грунтов, анализируя стандартные диаграммы рассеяния поля точек, представляющих собой пары значений этих свойств, достаточно трудно в виду отсутствия четко прослеживаемого тренда. Связано это с наличием широкого круга причин, среди которых можно выделить: 1) неточность привязки и описания поверхностных и неоднозначность установления подземных карстовых форм и их параметров; 2) различие в методах и инструментарии инженерно-

геологических изысканий разных лет; 3) разного рода ошибки, допущенные в ходе систематизации материалов исследований прошлых лет.

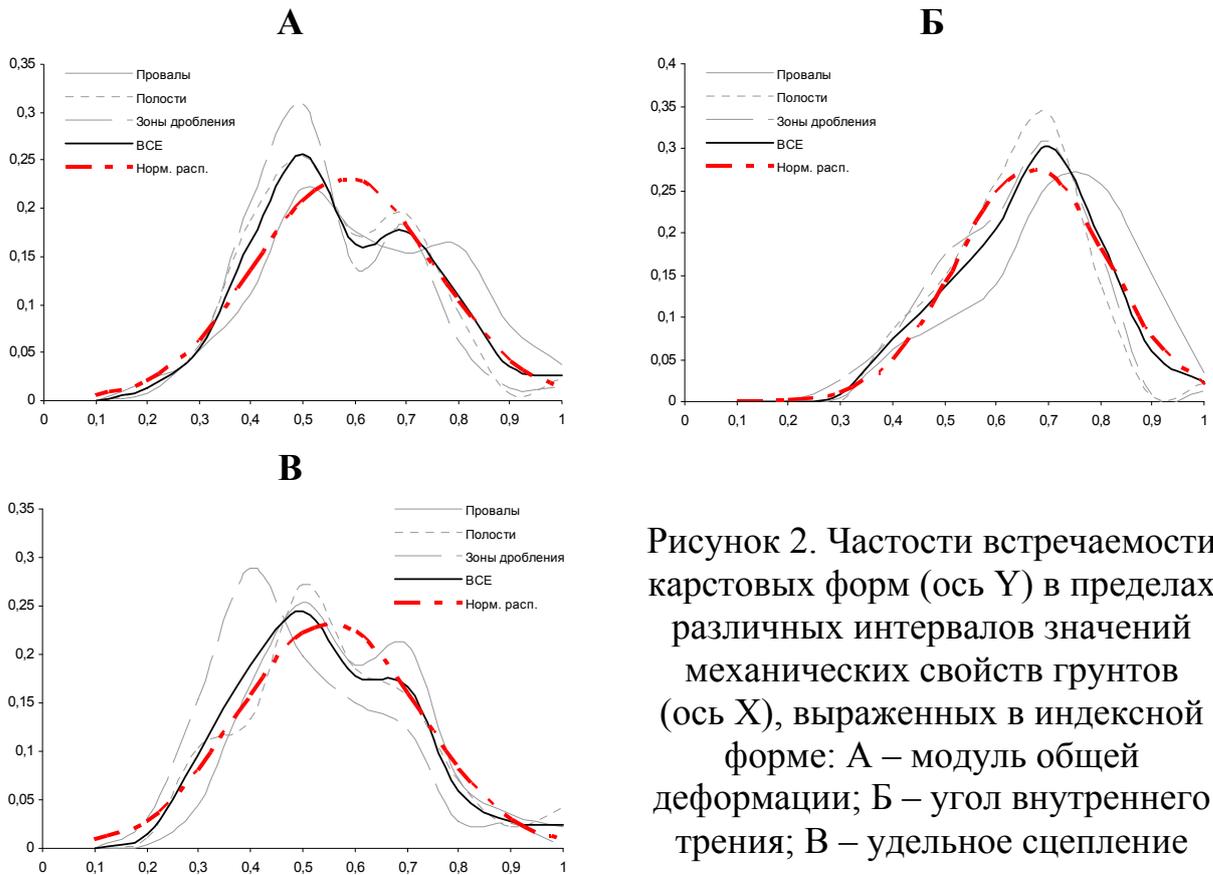


Рисунок 2. Частоты встречаемости карстовых форм (ось Y) в пределах различных интервалов значений механических свойств грунтов (ось X), выраженных в индексной форме: А – модуль общей деформации; Б – угол внутреннего трения; В – удельное сцепление

Таблица 3. Параметры нормального закона распределения для прогнозирования вероятности встречаемости карстовых форм по значениям механических свойств грунтов

Свойство	Среднее значение	Стандартное отклонение
Модуль общей деформации, МПа	15,4	5,2
Угол внутреннего трения, °	21,7	5,0
Удельное сцепление, кПа	32,8	11,1

Однако главная причина заключается в самой природе карстового процесса. На сегодняшний день общепринятыми являются лишь основные условия развития карста, каждое из которых характеризуется набором главных системообразующих факторов. Такое представление отражает лишь глобальную суть процесса. Объяснить же взаимодействия более высокого порядка на уровне конкретных показателей-факторов строения карстового массива, выявить и установить количественные взаимосвязи, возникающие между ними, существующая модель не может. Карстовый процесс – это сложно организованная природная система, зависящая от множества разносторонних показателей-факторов, и оценить влияние каких-либо определенных из них представляется крайне сложной задачей. Решение ее,

по мнению авторов, возможно только путем последовательного накопления новых все более детальных сведений об особенностях строения закарстованных территорий и последующей массовой статистической обработки геолого-карстологических данных.

Исходя из выше сказанного, характер зависимости между морфометрией карстовых форм и механическими характеристиками грунтов устанавливается по средним значениям морфометрических параметров в пределах равных интервалов значений механических свойств грунтов. На рисунке 3 отчетливо видна тенденция к росту средних значений морфометрических параметров карстовых форм на фоне роста значений механических характеристик грунтов, развитых на территории г. Кунгур.

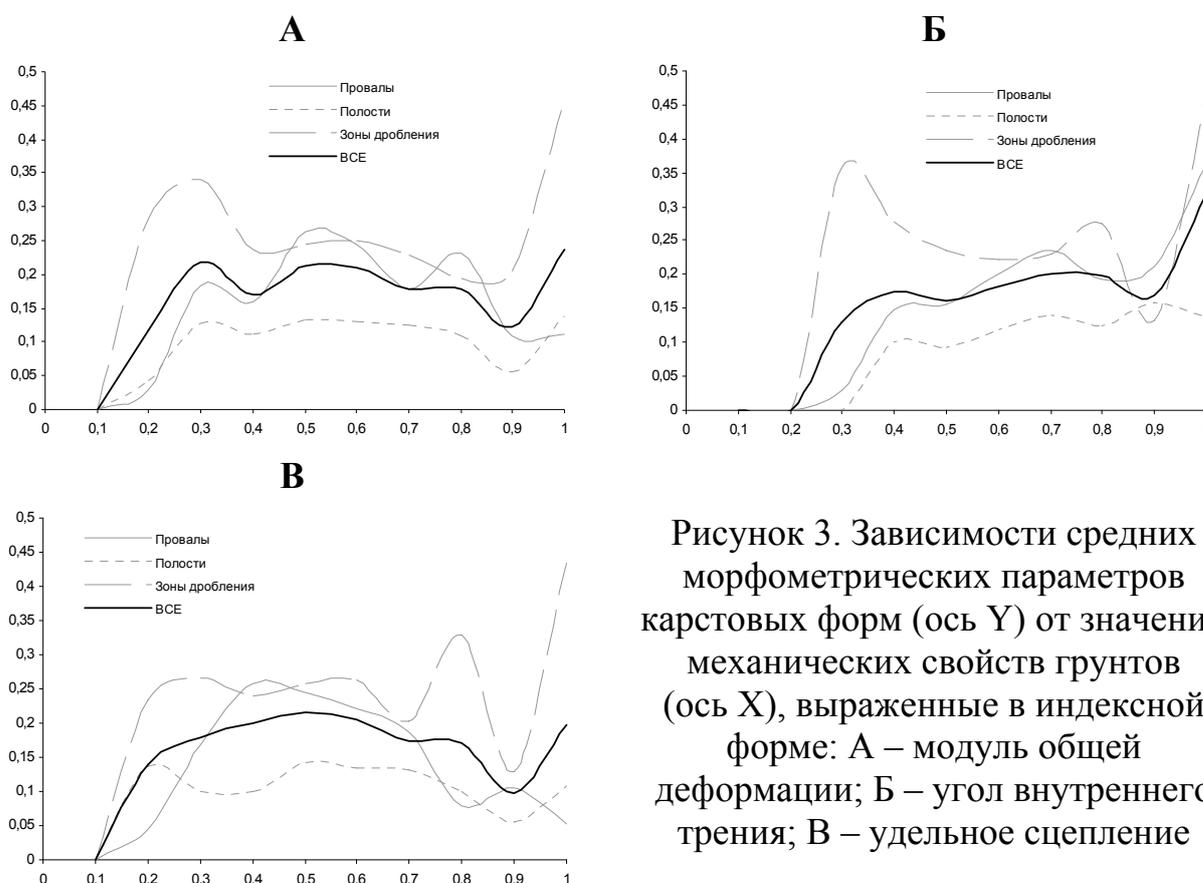


Рисунок 3. Зависимости средних морфометрических параметров карстовых форм (ось Y) от значений механических свойств грунтов (ось X), выраженные в индексной форме: А – модуль общей деформации; Б – угол внутреннего трения; В – удельное сцепление

Особенно ярко эта тенденция прослеживается для угла внутреннего трения. Характерной чертой всех графиков является наличие зоны «неявного тренда» в пределах средних значений свойств грунтов. Также следует отметить, что в случае анализа поверхностных карстовых форм тенденция к росту их средних диаметров с увеличением модуля деформации и удельного сцепления не подтверждается, что, по, всей видимости, вызвано спецификой методики исследования.

Принимая во внимание прямой характер зависимости морфометрических параметров карстовых форм от исследуемых свойств грунтов были выведены прогнозные линейные уравнения путем отбрасывания наиболее сильно отклоняющихся пар значений этих

показателей из общей совокупности (таблица 4). С помощью этих уравнений можно прогнозировать средние морфометрические параметры новых карстовых форм на территории города по известным значениям механических свойств грунтов перекрывающей толщи. Однако данный прогноз будет иметь лишь крайне приблизительный характер. Повышение точности прогнозной оценки возможно только с учетом всего множества показателей строения массива, слагающего исследуемую территорию и характеризующих ее природные особенности с самых разных сторон.

Таблица 4. Взаимосвязь основных морфометрических параметров карстовых форм и механических свойств дисперсных грунтов перекрывающей толщи на территории г. Кунгур

Свойство	Количество пар значений, шт.		Количество пар значений в выборке, %	Коэффициент линейной корреляции, д.е.	Прогнозное уравнение*
	в генеральной совокупности	в выборке			
1	2	3	4	5	6
<b>Провалы, воронки</b>					
Модуль общей деформации	489	122	24,9	0,76	$d = 1,4295E_0 - 1,9058$
Угол внутреннего трения	489	165	33,7	0,77	$d = 1,3383\varphi - 8,3654$
Удельное сцепление	489	105	21,5	0,76	$d = 0,7831c - 1,3655$
<b>Полости</b>					
Модуль общей деформации	508	109	21,5	0,77	$h = 0,7343E_0 - 3,2222$
Угол внутреннего трения	508	103	20,3	0,76	$h = 0,7095\varphi - 6,1242$
Удельное сцепление	508	112	22,1	0,76	$h = 0,4334c - 2,7085$
<b>Зоны дробления</b>					
Модуль общей деформации	385	72	18,7	0,79	$h = 0,4883E_0 - 0,0283$
Угол внутреннего трения	385	81	21,0	0,79	$h = 0,4952\varphi - 1,3351$
Удельное сцепление	385	151	39,2	0,77	$h = 0,2660c - 0,6494$
<b>Все карстовые формы</b>					
Модуль общей деформации	1382	292	21,1	0,76	$d = 0,0390E_0 - 0,0597$
Угол внутреннего трения	1382	212	15,3	0,76	$d = 0,0350\varphi - 0,0985$
Удельное сцепление	1382	406	29,4	0,76	$d = 0,0215c - 0,0775$

\* Условные обозначения:  $d$  – прогнозный средний диаметр, м;  $h$  – прогнозная высота полости или зоны дробления, м;  $E_0$  – модуль общей деформации, МПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, °;  $c$  – удельное сцепление, кПа

### Список литературы

1. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Лихая О.М., Ковалева Т.Г. Особенности геологического строения территории и пространственное распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгур) // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 77-93.
2. Пятунин М.С. К вопросу о создании базы данных инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. – Пермь, 2007. С. 212-215.
3. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований фундаментов зданий и сооружений. Москва, 2005.

4. Щербаков С.В. Физические свойства четвертичных дисперсных отложений и их влияние на активность карста // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. Перм. ун-т. – Пермь, 2010а. С. 265-268.

5. Щербаков С.В. Анализ подземной закарстованности на территории Полазненского полуострова // Геология в развивающемся мире: материалы I Всеросс. конф. студ., асп., и молодых ученых: в 2 т. Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2010б. Т. 2. С. 43-46.

6. Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2011. Том 153, кн. 1. С. 203-224.