

Алгоритм принятия проектных решений при строительном освоении закарстованных территорий

С.В. Щербаков, В.Н. Катаев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, email: greyvr@mail.ru, sherbakov@antikarst.ru, kataev@psu.ru

АННОТАЦИЯ: Существующие критерии выбора мер противокарстовой защиты в РФ основаны на качественном анализе. Показатели карстоопасности в количественной форме выражения либо не учитываются совсем, либо рассматриваются односторонне с позиции величины диаметра провала, на которую производится расчет фундаментов. Фактор неопределенности и случайности (риск) образования провала в зоне влияния сооружения или объекта при этом практически не учитывается. В работе рассматривается состояние вопроса по оценке карстового риска применительно к существующим и проектируемым объектам. Предлагается подход, позволяющий в конкретных карстоопасных условиях производить оценку рисков. Рассматривается алгоритм принятия решений о необходимости применения конструктивных и/или геотехнических мероприятий, базирующийся на известном уровне карстового риска. Предлагаемый подход позволяет определять не только характер противокарстовой защиты, но и оценивать ее эффективность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карст, карстоопасность, риск, провал, средний диаметр провала, интенсивность провалообразования, проектные решения, противокарстовые мероприятия.

На сегодняшний день в федеральных и территориальных строительных нормативах РФ и рекомендательной литературе отсутствуют жесткие количественные критерии, которые на основе численного моделирования, учитывающего минимально необходимый набор входных данных, позволяли бы максимально четко и объективно регламентировать рамки принимаемых проектных решений в условиях конкретных карстологических обстановок.

Действующие нормативно-правовые акты в области проведения инженерно-геологических изысканий для строительства регламентируют два основных параметра карстоопасности, на основании которых осуществляется проектирование зданий и сооружений на закарстованных территориях – это *интенсивность провалообразования* λ , шт./км²·год, и *ожидаемый диаметр карстового провала* d , м, именуемый в нормативных актах термином «*средний диаметр*» (СП 11-105-97, ч. II). Как видно, оба параметра имеют весьма конкретную численную форму выражения и интуитивно понятные единицы измерения. Однако, даже оперируя весьма конкретными значениями этих величин, вопрос о принятии тех или иных проектных решений в ре-

альной инженерной практике зачастую не находит строго определенного и унифицированного решения. Это касается таких аспектов, как применение конкретных мер противокарстовой защиты, расчет устойчивости фундаментов в данных карстологических условиях, целесообразность проектирования сооружений определенного назначения и уровня ответственности в пределах рассматриваемого участка и ряда других.

Имеющиеся в настоящее время критерии выбора характера противокарстовой защиты построены применительно к отдельным категориям устойчивости, выделяемым по показателю интенсивности образования провалов (СП 116.13330.2012, прил. Е; ТСН 302-50-95 РБ, табл. 4.1). Столь широкие рамки, определяемые отдельными категориями, зачастую приводят к неверному выбору противокарстовой защиты, что выражается как в недостаточности принимаемых мер, так, и наоборот, в излишней защите, которая вызывает повышение стоимости строительства (Кобыща, Бочкарева, 2012).

1 ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПРОТИВОКАРСТОВЫХ МЕРОРИЯТИЙ

В настоящее время задачи, связанные с оценкой карстовых рисков и принятием проектных решений при строительстве объектов в районах развития карста с провальной карстовой опасностью, наиболее удовлетворительно решаются вероятностными методами с применением математического аппарата теории вероятности и надежности систем. В данном контексте является очевидной необходимость знания, с одной стороны, активности образования новых карстовых форм (в частности, провалов) и их размеров, и параметров проектируемого объекта – с другой.

На сегодняшний день в этом направлении имеется ряд прорывных разработок, связанных, главным образом, с исследованиями Дзержинских карстоведов. Например, в «Рекомендациях по проектированию фундаментов на закарстованных территориях», вышедших еще в 1985 г. под эгидой НИИОСП, приведена методика определения величины *пролета карстового провала* l_d под проектируемыми фундаментами в данных карстоопасных условиях, что позволяет вести расчет их устойчивости, опираясь на конкретную величину. Такой подход дает возможность более точно определять характер необходимой конструктивной противокарстовой защиты сооружения. К сожалению, данные рекомендации не получили широкого распространения на территории России и наиболее активно используются при проектировании зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области и соседних регионов.

В 2012 г. с выходом «Рекомендаций по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области» нормативно впервые были закреплены такие понятия, как *удельный* P_r и *допустимый* R_n *карстовые риски*, а также их отношение P_r/R_n , именуемое *относительным уровнем карстового риска* LR . В зависимости от значений параметра LR данным нормативом устанавливается рекомендуемый комплекс противокарстовых мероприятий, проведение которых целесообразно в данных карстологических условиях с целью снижения карстового риска. Также на базе параметра LR коллегами из Дзержинска несколько усовершенствована ранее разработанная (Рекомендации..., 1985) модель расчета величины пролета карстового провала под площадью сооружения (Махнатов, Уткин, 2012).

Однако, несмотря на очевидные достоинства, выше отмеченные методики и способы также обладают рядом недостатков и неудобств, что делает их практически непригодным для практиче-

ского применения широкой массой инженеров-проектировщиков, работающих с карстовыми объектами. По нашему мнению, к наиболее существенным упущениям данных подходов могут быть отнесены следующие моменты:

1. Для расчета карстового риска и пролета карстового провала под сооружением или отдельным фундаментом помимо нормативных параметров карстоопасности (интенсивности провалообразования и средних диаметров провалов) также необходимо устанавливать закон распределения провалов по диаметрам. Последнее условие практически невыполнимо при исследованиях в слабоизученных в карстовом отношении районах, а также в регионах и городах, где не проводились регулярные наблюдения за процессом провалообразования.

2. Расчет величины пролета карстового провала под площадью сооружения базируется на методе статистических испытаний, также известном как метод Монте-Карло. Алгоритм применения данного метода не приведен в рекомендательных нормативных актах, а в карстологической литературе (Толмачев и др., 1986) он освещен крайне скудно. Более того, метод Монте-Карло труднореализуем на практике без применения ЭВМ, а специализированных программных средств, доступных на отраслевом рынке, попросту не существует.

3. Выводы о необходимости применения тех или иных мер противокарстовой защиты базируются на сравнении удельного карстового риска, рассчитанного для конкретных условий карстоопасности, с некоторым допустимым значением. Ответственность за назначение допустимого уровня карстового риска для конкретного объекта ложится на плечи проектировщика или застройщика (п. 6.30 «Рекомендации...», 2012). При этом конкретных рекомендаций для обоснования этой величины нет, а приведенные в табл. 6.3 «Рекомендаций...» (2012) критерии определения величины допустимых удельных рисков на 1 га территории за 100-летний срок носят декларативный характер, не имея под собой надежной статистической подосновы.

Учитывая вышесказанное, становится совершенно очевидным, что на данном этапе развития инженерно-карстологической науки и практики назрела необходимость в разработке способов и подходов, которые бы на базе количественных оценок давали инженеру-проектировщику четкое понимание об эффективности и долговечности применяемых им конструктивных решений в различных карстологических условиях. В то же время, такие способы должны быть максимально доступны для понимания и предельно ясны в отношении практического применения на объектах различного назначения и уровня сложности (Scherbakov, 2013; Щербakov, 2014).

Далее в данной работе, с учетом ранее предложенных разработок и опыта исследований прошлых лет, предлагается один из возможных путей разрешения рассматриваемой проблематики.

2 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАРСТОВОГО РИСКА

2.1 Определение вероятности образования провала под объектом

Одной из ключевых и первоочередных задач оценки карстового риска применительно к конкретному объекту (сооружению, отдельной опоре, элементу фундамента, трубопроводу и пр.) является определение **вероятности образования провала в пределах площади объекта** P_o . Решение этой задачи уже неоднократно приводилось ранее в научно-технической литературе (Толмачев, 1980; Толмачев и др., 1986; Толмачев, Ройтер, 1990). В его основе лежит предположение о распределении образования провалов в течение времени, подчиняющемся экспоненциальному закону. При определении вероятности P_o одним из обязательных условий является знание интенсивности формирования провалов λ на данной территории во времени. Рекомендуемая расчетная формула для определения вероятности P_o имеет следующий вид:

$$P_o = 1 - \exp\left(\frac{-\lambda S_{od} t}{1000000}\right), \quad (1)$$

где S_{od} – площадь объекта с учетом зоны влияния карстового провала, м²; t – расчетный срок службы объекта, лет.

Площадь S_{od} целесообразно устанавливать с учетом площади буферной зоны S_d , очерчиваемой на расстоянии от краев объекта, равном половине ожидаемого диаметра провала $d/2$ (рисунок 1). Также возможны варианты, при которых площадь зоны влияния провала вокруг сооружения устанавливается с учетом половинного расстояния, определяемого от максимально возможного диаметра провала $d_{max}/2$.



Рисунок 1. Пример возможного определения площади зоны влияния провала.

2.2 Определение площади соприкосновения провала и объекта

Немаловажное значение при оценке карстового риска, которому подвергается проектируемый объект, имеет определение **вероятной области поражения объекта карстовым провалом** некоторого известного диаметра d , рекомендуемого для исследуемого участка по итогам инженерно-геологических и/или карстологических изысканий. Данная задача до сих пор не имеет универсального решения, а количество опубликованных по этой тематике научно-технических работ не насчитывает и одного десятка полнотекстовых публикаций, как в зарубежной, так и в отечественной карстологической литературе.

Очевидно, что расчет вероятной области поражения объекта провалом невозможен без знания распределения диаметров карстовых провалов, ранее фиксируемых в исследуемом районе. На сегодняшний день установлено, что такое распределение практически всегда с достаточной точностью может быть описано либо нормальным, либо логнормальным законом. При известном распределении диаметров провалов легко устанавливается вероятность образования провала P_d , диаметр которого будет меньше некоторого ожидаемого значения d в пределах изученной площади развития карстовых форм S :

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \int_0^d e^{-\frac{(d-d_{sr})^2}{2\sigma_d^2}} dd, \quad (2)$$

где d – диаметр провала, ожидаемого на участке проектируемого строительства, м; σ_d – стандартное отклонение значений диаметров провалов, ранее образовавшихся в исследуемом районе, м; d_{sr} – средний диаметр карстовых провалов, ранее образовавшихся в исследуемом районе, м.

Распределение карстовых провалов по величине их диаметров при переходе от одного исследуемого района к другому может варьировать в зависимости от геолого-гидрогеологических, структурно-тектонических, геоморфологических и инженерно-геологических условий развития карста.

Если для исследуемой территории имеются достаточно полные сведения о процессе провалообразования или непосредственно для изучения доступны карстовые воронки относительно молодого возраста, то тип и параметры распределения провалов по величинам их диаметров целесообразно устанавливать исходя из фактических данных. Если же подобных сведений нет, то при оценке вероятности P_d может быть применено распределение морфометрических параметров различных карстопроявлений, установленное по данным анализа многочисленных карстовых форм (как поверхностных, так и подземных) в

разное время закартированных в пределах территории Пермского края (Щербаков, Катаев, 2013). В данном случае формула для оценки вероятности P_d будет иметь следующий вид:

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 1.02} \int_0^d e^{-\frac{\left(\ln \frac{d}{100} + 2.74\right)^2}{2 \cdot 1.02^2}} dd \quad (3)$$

Ручное вычисление формулы (3) следует производить с использованием специализированных таблиц, составленных для нормально распределенных величин и приведенных в справочной литературе по математической статистике. Однако, это достаточно трудоемкий процесс. Более простой способ ее расчета – с помощью ЭВМ, например, в программных пакетах Excel, Calc, MatLab, MathCad или программах-анализаторов. Вероятность P_d помимо расчета по выше приведенной формуле может быть приблизительно определена графически из рисунка 2.

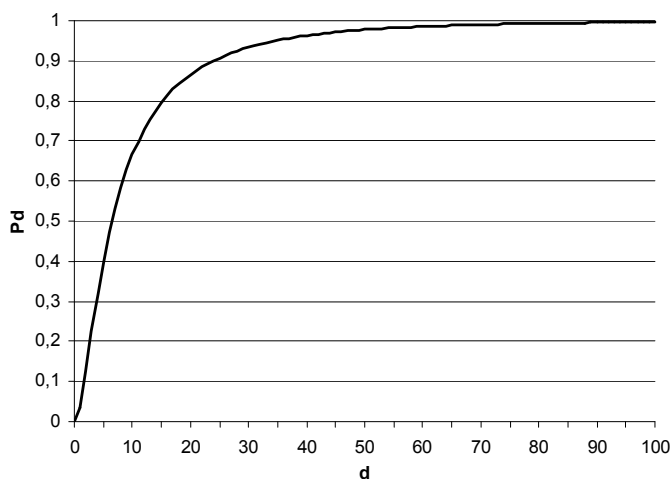


Рисунок 2. Интегральная кривая для определения вероятности P_d , д.е., для заданного диаметра карстового провала d , м.

Образование провала в зоне влияния какого-либо объекта (сооружения, отдельного здания, фундамента) подчиняется конкретной статистической закономерности. Наиболее вероятные места образования провалов приурочены к периферийным частям объектов, значительно реже провалы фиксируются в их центральных областях. Данная закономерность неоднократно отмечалась на реальных объектах, подвергшихся воздействию провалов. Например, карстовые провалы, образовавшиеся в г. Аллентаун (штат Флорида, США) под зданием бизнес центра Корпорэйт Плаза («Corporate Plaza») и находящейся неподалеку от него многоуровневой парковки, задели лишь периферийные части сооружений (Waltham и др., 2005). Площадь совместного соприкосновения провалов и зданий не превысила 10-15 %, что, однако, не уберегло от катастрофических последствий. Как отмечает В.В. Лушников (2012), провал диаметром 6 м образовался в

г. Березовский Свердловской области под зданием пятиэтажного жилого дома, задев его периферийную часть в центральной секции здания. И таких примеров, опубликованных в карстологической литературе, насчитывается достаточное количество.

Отмеченная выше зависимость одинаково характерна как площадным, так и линейным объектам, независимо от формы в плане первых и длины последних. Однако, следует заметить, что в случае площадных объектов такая тенденция наблюдается только при условии незначительной разницы между площадью объекта и провала. При стократном превышении площади объекта над площадью провала вероятность образования последнего во внутренней области объекта практически сравнивается с вероятностью его формирования в периферийной части. При дальнейшем увеличении отношения площадей наиболее вероятен сценарий, при котором провал произойдет непосредственно под исследуемым объектом. К счастью, такие ситуации, когда площадь сооружения и тем более его отдельных фундаментов во много раз превышает площадь ожидаемых провалов, в инженерно-строительной практике являются скорее исключением, нежели правилом.

Частным и наиболее показательным случаем может служить рассмотрение взаимодействия провала и объекта одинаковой площади. При различном расположении провала площадью S_s и объекта площадью S_o возможны разные варианты их взаимного перекрытия с некоторой площадью S_z . В данном случае целесообразно выделить самостоятельный показатель – коэффициент безопасности K_{sf} , д.е., определяемый по формуле:

$$K_{sf} = \frac{S_z}{S_s} \quad (4)$$

Из результатов моделирования и статистического анализа возможных вариантов взаимного расположения провала и объекта установлено, что распределение коэффициента безопасности K_{sf} тяготеет к логарифмически нормальному виду с вероятностью перекрытия исследуемого объекта карстовым провалом равной P_K .

Очевидно, что величина коэффициента безопасности напрямую зависит от соотношения размеров ожидаемого карстового провала и объекта, подверженного риску. При многократном превышении площади провала по отношению к площади объекта, вероятность P_K , а вместе с ней и K_{sf} , будут стремиться к единице. При значительном превышении площади провала по отношению к площади объекта значения K_{sf} могут превзойти единичный порог. Описанные выше обстоятельства обычно характерны для ситуаций,

когда ожидаемый провал, при условии образования в зоне влияния сооружения, практически полностью перекроет его площадь или затронет значительную часть сооружения. В обратном случае, когда площадь провала в значительной степени меньше площади объекта, параметр K_{sf} стремится к нулю. Таким образом, принимая во внимание характерную взаимосвязь между размерами провала и значениями коэффициента безопасности, определение последнего в практических расчетах может быть осуществлено по известной вероятности распределения диаметров провалов P_d , приравненной к вероятности P_K , в результате обратного решения формулы (5):

$$P_d \approx P_K = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,8} \int_0^{K_{sf}} e^{-\frac{(K_{sf}+1,65)^2}{2 \cdot 0,8^2}} dK_{sf} \quad (5)$$

Как и с формулой (3), вычисление коэффициента безопасности по формуле (5) лучше производить при помощи ЭВМ, в специализированных программных пакетах. Ориентировочное значение коэффициента безопасности при известной вероятности P_d также может быть определено по графику, приведенному на рисунке 3.

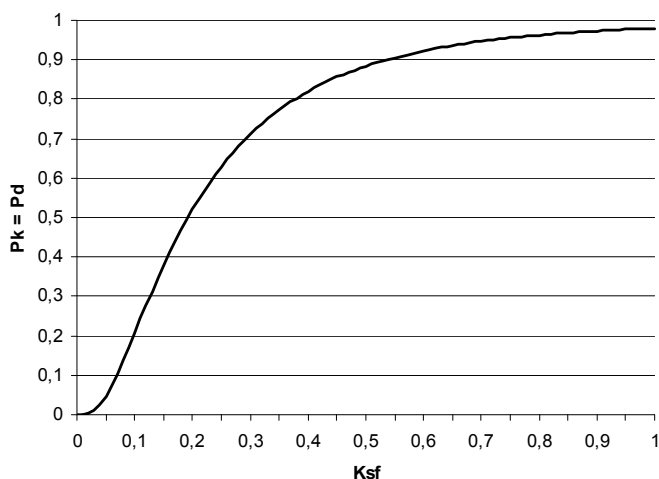


Рисунок 3. Интегральная кривая для определения коэффициента безопасности K_{sf} , д.е., при известных вероятностях P_d или P_K , д.е.

Если значение вероятностей P_d или P_K приближаются или максимально близки единице, рассчитываемые по формуле (5) значения коэффициента безопасности могут оказаться равными, а в исключительных случаях, даже превысить единичный порог. Такое возможно, когда ожидаемый диаметр провала в пределах интересующего участка оказывается близким к максимально возможному при данном распределении диаметров. В реальной инженерно-геологической практике выше описанная ситуация практически исключается. Тем не менее, если вычисляемое значение коэффициента безопасности по каким-то причинам превышает единичный по-

рог, то его следует искусственно округлять в меньшую сторону и принимать равным 1.

В случаях, когда коэффициент безопасности близок или равен единице, следует ожидать полное разрушение объекта при условии образования под ним или в зоне его влияния карстового провала. Конструктивная защита и усиление фундаментов при таких условиях не принесут положительных результатов.

При известном значении коэффициента безопасности появляется возможность оценить *ожидаемую часть площади провала под исследуемым объектом* S_f :

$$S_f = S_s K_{sf} \quad (6)$$

Параметр S_f по своей сути является своеобразным аналогом расчетного пролета карстового провала l_d , с той лишь разницей, что он имеет площадную форму выражения и не учитывает вероятность образования провала непосредственно в зоне влияния объекта P_o .

Аналогичным образом может быть получена оценка *диаметра части провала под исследуемым объектом* d_f :

$$d_f = d K_{sf} \quad (7)$$

Заметим, что формула (7) дает ориентировочное представление о величине пролета провала, т.к. не учитывает форму провала в плане, а также форму площади взаимного пересечения провала и объекта.

При определенных условиях в практическом плане величина площади S_f или производные от нее величины (диаметры, хорды), а также диаметр d_f , могут служить мерой необходимого и достаточного уровня конструктивной защиты проектируемых противокарстовых фундаментов.

2.3 Определение вероятности повреждения объекта карстовым провалом

Знание закономерности распределения возможного местоположения провала с известным диаметром под площадью объекта (здания, сооружения, отдельного фундамента и пр.), выражаемой коэффициентом безопасности, позволяет оценивать *вероятность полного разрушения объекта*.

Согласно действующим нормативным актам, при проектировании зданий и сооружений на закарстованных территориях должны предусматриваться конструктивные и/или геотехнические мероприятия с целью обеспечения надежного уровня противокарстовой защиты. Конструктивные мероприятия выполняются в первую очередь и сводятся к выбору более габаритных и жестких фундаментов, а также усилению несущих конструкций. Расчет конструктивной защиты заклю-

чается в моделировании устойчивости фундамента к провалу, диаметр которого не превышает некоторого *критического значения* d_{cr} . В качестве критического значения диаметра провала в расчетах могут быть учтены средний (ожидаемый) диаметр провала или величина некоторого возможного пролета карстового провала под площадью фундамента или сооружения в целом, выражаемая величинами l_d , S_f , d_f или их аналогами.

В карстологических целях при оценке вероятности полного разрушения объекта наиболее подходящим является экспоненциальное приближение. Если проектом сооружения предусмотрена конструктивная противокарстовая защита, обеспечивающая его устойчивость к провалу диаметра d_{cr} , то *вероятность полного разрушения* P_{od} может быть определена по формуле:

$$P_{od} = 1 - \exp\left(-K_{sf} \frac{d}{d_{cr}}\right) \quad (8)$$

2.4 Расчет карстового риска

Знание вероятностей P_o и P_{od} позволяет решать задачи, связанные с оценкой надежности и рисков как проектируемых, так и уже существующих в пределах закарстованных участков объектов. В этой связи целесообразно ввести новый показатель – *вероятность повреждения объекта* R в результате образования провала:

$$R = P_o P_{od} \quad (9)$$

Показатель R устанавливает величину возможного *карстового риска*, которому будет подвержен проектируемый или уже существующий объект в течение всего срока его эксплуатации в условиях конкретной карстологической обстановки.

Величиной, обратной расчетному риску, является *надежность* P сооружения – вероятность его безотказной работы в течение эксплуатационного периода:

$$P = 1 - R \quad (10)$$

Расчет параметров риска и надежности в первом приближении целесообразно производить применительно к сооружению в целом. Для этого при определении параметра P_o расчет производится по отношению к общей площади сооружения.

Более точная оценка риска может быть достигнута в результате расчета P_o применительно к площади фундамента, под которой понимается суммарная площадь отдельных плит, блоков и отсеков с учетом их количества и сочетания в плане. В таком случае расчет карстового риска

ведется применительно к каждому отдельно взятому элементу фундамента. Итоговый для всего фундамента *расчетный карстовый риск* R_f определяется по формуле:

$$R_f = \sum_{i=1}^N R_i - \prod_i R_i \quad (11)$$

где i – элемент фундамента; N – количество различных элементов фундамента, шт.; R – карстовый риск, присущий для i -го элемента фундамента, определяемый по формуле (9).

Величины надежности и риска надлежит рассматривать как ключевые параметры, определяющие возможность проектирования и строительства зданий и сооружений в конкретных карстологических условиях. Для этого авторы «Рекомендаций...» (2012) предлагают осуществлять сравнение расчетного уровня карстового риска с некоторым *допустимым значением* R_n , гарантирующим на принятом уровне значимости безаварийную эксплуатацию объекта.

2.5 Оценка времени безаварийной эксплуатации объекта

К сожалению, вопрос о необходимости принятия тех или иных проектных решений, основываясь на критерии сравнения фактических и допустимых уровней карстового риска, оказывается трудно разрешимым на практике. О проблемных моментах такого подхода уже отмечалось выше. Наиболее слабым местом является объективность назначения допустимого уровня риска.

В этой связи актуальной является задача разработки альтернативных критериев, позволяющих судить о величинах допустимых рисков для конкретных объектов, а также о характере необходимых противокарстовых мероприятий и эффективности проектных решений, принимаемых в данных карстологических условиях. По нашему мнению, таким критерием может служить *период времени безаварийной эксплуатации сооружения*.

На сегодняшний день установлено, что формирование провалов во времени в 99 % случаев близко или соответствует закону Пуассона (Толмачев, 1980). Известно, что для событий, распределенных по закону Пуассона, характерно экспоненциальное или показательное распределение интервалов между ними. Из последнего утверждения следует, что для определения *периодичности образования провалов* T , лет, может быть применена следующая формула:

$$T = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

Величина T дает представление о сроке, по истечении которого следует ожидать образова-

ние нового провала в пределах ореола, площадь которого учтена в расчете интенсивности провалообразования.

По известным значениям коэффициента безопасности и вероятности полного разрушения объекта, можно оценить его устойчивость в пересчете на *минимальное количество провалов* n_{\min} , образование которых в зоне влияния объекта неизбежно приведет к его полному выходу из строя:

$$n_{\min} = \frac{\ln K_{sf}}{\ln(1 - P_{od})} \quad (13)$$

Параметр n_{\min} является условной величиной, принимающей значения из диапазона $[0; +\infty]$. Значения, меньшие единицы, свидетельствуют о малой устойчивости объекта не только к провалу, но и к неравномерным оседаниям грунтов основания. Если n_{\min} близко или стремится к нулю, то образование провала в зоне влияния объекта при любых раскладах приведет к аварийной ситуации.

Период времени безаварийной эксплуатации сооружения следует определять исходя из двух сценариев развития карста – *пессимистичного* T_1 и *оптимистичного* T_2 .

Пессимистичный сценарий предполагает безусловное образование следующего провала непосредственно в зоне влияния сооружения. Ожидаемое время до аварийного случая определяется формулой:

$$T_1 = T n_{\min} \quad (14)$$

Оптимистичный сценарий при определении времени возникновения аварийной ситуации учитывает вероятность образования провала в пределах площади сооружения:

$$T_2 = T_1 P_o \quad (15)$$

При известном времени T_1 появляется возможность оценки *максимально допустимого уровня карстового риска* для данного объекта, значение которого определяется по формуле:

$$R_{\max} = 1 - \exp\left(\frac{-\lambda S_{od} T_1}{1000000 P_{od}}\right) \quad (16)$$

Максимально допустимый карстовый риск для фундамента $R_{f\max}$ определяется в соответствии с формулой (11), только вместо значения действующего карстового риска R_i , подставляется значение максимально допустимого карстового риска $R_{f\max,i}$ для данного элемента фундамента.

Сравнение временных периодов T_1 и T_2 с расчетным сроком службы сооружения t позволяет планировать необходимость осуществления того или иного комплекса противокарстовых меро-

приятий, а также оценивать их эффективность. Последняя будет тем выше, чем больше разница между периодами времени T_1 и T_2 и расчетным сроком службы.

При проектировании объектов повышенного уровня ответственности на закарстованных территориях комплекс противокарстовых мероприятий должен обеспечивать безоговорочное одновременное выполнение двух условий $T_1 > t$ и $n_{\min} > 1$. Для сооружений второго уровня ответственности желательно с запасом должны выполняться условия $T_2 > 10t$ и $n_{\min} > 1$. Объекты пониженного уровня ответственности должны как минимум удовлетворять условию $T_2 > t$.

С целью повышения определенности принятия конкретных проектных решений целесообразно ввести вспомогательную величину времени t_1 , определяемую по формуле:

$$t_1 = \frac{t}{n_{\min}} \quad (17)$$

Сравнивая период времени до возникновения аварийного случая при пессимистичном сценарии развития карста T_1 с временной величиной t_1 можно в значительной степени повысить объективность оценки устойчивости проектируемой конструкции в данных карстоопасных условиях. Так, необходимый уровень защиты будет достигнут при соблюдении неравенства $T_1 \geq t_1$.

3 ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОКАРСТОВОЙ ЗАЩИТЫ

Продемонстрируем применение выше рассмотренных зависимостей на конкретном примере.

Предположим, что на некотором участке проектируется 4-этажный жилой дом, размеры в плане – 15×50 м, срок службы t – 100 лет, уровень ответственности – II (нормальный). По результатам проведенных инженерно-геологических изысканий район, в пределах которого расположена площадка проектируемого строительства, характеризуется категорией устойчивости III-V с интенсивностью провалообразования $\lambda = 0.075$ пров./км²·год и средним диаметром провала $d = 8.5$ м. Изначальный проект фундамента предусматривает возможность безаварийной эксплуатации здания при условии образования провала под ним диаметром d_{cr} не более 2 м.

Алгоритм действий по оценке эффективности принятых проектных решений и их корректировке сводится к последовательному выполнению следующих операций:

1) по формуле (1) вычисляется вероятность $P_o = 0.00780$;

2) по формуле (3) или рисунку 2 в зависимости от величины среднего диаметра провала устанавливается вероятность $P_d = 0.60600$;

3) по формуле (5) или рисунку 3 с учетом только что определенной вероятности P_d вычисляется значение коэффициента безопасности $K_{sf} = 0.24$;

4) с применением формул (6) и (7) вычисляется ожидаемая площадь части провала под сооружением $S_f = 13.51 \text{ м}^2$ и диаметр части провала под исследуемым объектом $d_f = 2.03 \text{ м}$ (при расчете величины S_f площадь провала S_s определяется ориентировочно из предположения, что он будет иметь округлую форму);

5) по формуле (8) с учетом известной по проекту величины критического диаметра провала d_{cr} определяется вероятность $P_{od} = 0.63673$.

6) с использованием формул (9) и (10) определяются величины карстового риска и надежности применительно к сооружению целом: $R = 0.00497$ и $P = 0.99503$;

7) с применением формул (12)–(15), (17) последовательно вычисляются величины периодичности образования провалов, устойчивости сооружения в пересчете на минимальное количество провалов, периоды времени безаварийной эксплуатации для пессимистичного и оптимистичного сценариев, а также величина t_1 : $T = 13.3$ лет, $n_{\min} = 1.4$ провала, $T_1 = 18.9$ лет, $T_2 = 2420.9$ лет, $t_1 = 70.6$ лет;

8) по формуле (16) определяется максимально допустимый карстовый риск для данного объекта в данных условиях карстоопасности $R_{\max} = 0.00426$;

9) производится сравнение фактического R и максимально допустимого R_{\max} уровней риска, а также величин T_1 и t_1 : для обеспечения минимальной устойчивости сооружения в данных карстологических условиях должно выполняться неравенство $R < R_n$, необходимая устойчивость сооружения будет достигнута, если дополнительно будет выполнено условие $T_1 \geq t_1$;

10) если указанные в п. 9 неравенства не выполняются, то применяемые конструктивные решения по усилению фундамента недостаточны и проект фундамента необходимо скорректировать на восприимчивость к образованию провалов больших диаметров. Для этого, последовательно увеличивая величину d_{cr} , повторяем действия, указанные в п.п. 5–8, до тех пор, пока не будут удовлетворены условия, приведенные в п. 9. В данном примере для обеспечения минимальной устойчивости ($R < R_n$) проектируемого жилого дома его фундаменты должны быть спроектированы с учетом возможности образования провала в основании здания диаметром не менее 2.9 м. Оптимальной уровень конструктивной противокарстовой защиты сооружения ($T_1 \geq t_1$) будет обеспечен при $d_{cr} = 3.9 \text{ м}$.

4 ВЫВОДЫ

Приведенный в работе способ оценки и анализа карстовых рисков, характерных для различных строительных объектов в конкретных условиях карстоопасности, не претендует на стопроцентную объективность и достоверность конечных результатов. Некоторые из рассмотренных выше постулатов по-прежнему требуют дополнительных наблюдений и исследований для расширения и уточнения понимания основ функционирования системы «карст – сооружение» в вероятностном аспекте. Однако уже на данном этапе применение предложенного подхода, опираясь на основные показатели карстоопасности и критический диаметр провала для данного типа сооружения, позволяет системно и обоснованно судить об эффективности принимаемых мер противокарстовой защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кобыща О.Е., Бочкарева Т.М. Оптимизация противокарстовых мероприятий для различных категорий карстовой опасности территории применительно к Пермскому краю // *Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа)*. Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 161-166.
- Лушников В.В. Об умении жить на территориях с нестабильными грунтами (на примере анализа несостоявшейся аварии на Урале) // *Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа)*. Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 65-71.
- Махнатов С.В., Уткин М.М. Способ определения параметров конструктивной противокарстовой защиты // *Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы Российской конференции с международным участием (22-23 мая 2012 г., г. Уфа)*. Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 72-77.
- Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях*. М., 1985. 53с.
- Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области*. Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области. Нижний Новгород, 2012. 140 с.
- СП 11-105-97. *Инженерно-геологические изыскания для строительства*. Ч. II. *Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов*. М.: ПНИИИС. 2001. 101 с.
- Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // *Инженерная геология*. 1980. № 3. С. 98-107.
- Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. *Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий*. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.

Щербаков С.В., Катаев В.Н. К оценке морфометрических параметров карстовых форм // *Инженерная геология*. 2013. № 1. С. 56-64.

Щербаков С.В. Оценка активности и масштабов развития карста на территориях Пермского Предуралья по данным изучения их природного строения // *Сергеевские чтения. Вып. 16. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21 марта 2014 г.)*. Москва: РУДН, 2014. С. 645-650.

Scherbakov S.V. Modern approach to an assessment of karst hazard // *Global View of Engineering Geology and the Environment: proceeding of the International symposium and 9th Asian Regional conference of IAEG, Beijing, China, 23-25 September 2013*. CRS Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013. P. 867-872.

Waltham T., Bell F., Culshaw M. *Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2005. 405 p.

Algorithm to acceptance of design decisions in building on the territories with karst occurrence

S.V. Shcherbakov & V.N. Kataev

Perm State University, Perm, Russia, email: greyvr@mail.ru, sherbakov@antikarst.ru, kataev@psu.ru

ABSTRACT: Known criteria of choosing karst safety measures in Russian Federation are based on qualitative approach. Parameters of karst hazard in quantitative form are not considered, or analyzed one-sided from the position of probable collapse diameter, which are using in foundation calculations. Factor of ambiguity and probability (risk) of collapse occurrence within the influence zone of building or object is not fully taking into account. This paper considers problems of karst risk assessment applied to existing and projected objects. Propose an approach, which allows in specific karst hazard conditions apply estimation of risk. Algorithm to decision-making about the necessity of application of constructive and/or geotechnical measures of karst control, based on the known level of karst risk, is offered. Such approach not only allows estimate the character of karst safety measures, but also allows compute its effectiveness.

KEYWORDS: *karst, karst hazard, risk, sinkhole, average diameter, intensity of sinkhole occurrence, design decisions, karst protection management.*