

Н.З.ГОТМАН

Доктор технический наук, ГУП институт «БашНИИСтрой» (Уфа)
Тел. (347) 2433475, e-mail: niistroy@mail.ru

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАСЧЕТОВ ФУНДАМЕНТОВ НА ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Проектирование фундаментов на закарстованных территориях основано на применении 2-х основных принципов противокарстовой защиты, а именно: приспособление конструкций здания к образованию карстовых деформаций и недопущение развития карстовых деформаций в основании .

Наиболее щадящими по отношению к природе является 2-ой принцип, когда мероприятия противокарстовой защиты проектируются на основе расчетов, обеспечивающих достаточную несущую способность фундаментов и надфундаментных конструкций для восприятия дополнительных нагрузок, возникающих при образовании карстовых деформаций в основании, что как правило достигается двумя путями:

- расчетом фундаментов совместно с надфундаментными конструкциями при образовании карстовых деформаций заданных параметров;

- прорезанием карстующихся грунтов и опиранием фундаментов на монолитные скальные грунты.

1 Теоретические основы расчета фундаментов при образовании карстовых деформаций

1.1 Расчетные параметры карстовых деформаций

Расчетные параметры карстовых деформаций определяются в зависимости от типа карстовых деформаций. Возможны три варианта развития карстовых деформаций: по типу «провал», когда карстовая полость развивается в карстующихся грунтах и “всплывает” под подошву фундамента; по типу «оседание» как провал в результате развития суффозионных процессов в покрывной толще; по типу «локальное оседание», когда карстовая полость развивается в карстующихся грунтах или в покрывной толще, но не всплывает под подошву фундамента.

Выбор варианта развития карстовых деформаций определяется грунтовыми условиями и конструктивными особенностями здания. Принимается наиболее опасный вариант развития карстовых деформаций. Для мелкозаглубленных зданий целесообразно выполнять расчеты на образование карстового провала под подошвой фундамента, при этом в качестве расчетного параметра карстовой деформации принимается расчетный диаметр карстового провала, или на образование мульды оседания с заданными параметрами. Для зданий с подземной частью наиболее опасным может быть карстовая деформация по типу «локальное оседание», так как фундамент приближается к карстующимся грунтам и рост полости в

них, даже при условии сохранения устойчивости свода, может вызвать значительные дополнительные усилия в несущих конструкциях подземной части. При этом в качестве расчетного параметра карстовой деформации может быть принят размер карстовой полости, при котором свод полости устойчив.

Методики определения расчетных параметров карстовых деформаций совершенствуются и развиваются инженерами-геологами и геотехниками [Толмачев В.В. и др., 2012, Хоменко В.П., 2009], но в связи со сложной природой механизмов карстообразования все эти методы достаточно приближенны и применимы лишь в рамках допущенных рисков.

1.2 Основные расчетные положения

Расчетные положения, обеспечивающие эксплуатационную надежность карстозащитных фундаментов, включают расчетные требования и расчетные критерии.

Основными расчетными требованиями, устанавливаемыми нормативными документами, являются обеспечение прочности фундаментов (1-ое предельное состояние) и недопущение развития предельных неравномерных деформаций основания здания (2-е предельное состояние), а расчетными критериями - несущая способность основания фундаментов, несущая способность сечений ростверка и допускаемые неравномерные деформации основания. Расчет фундаментов на образование карстовых деформаций включает два основных этапа, а именно статический расчет при образовании карстовых деформаций и сопоставление результатов расчета усилий в сечениях ростверка, давлений под подошвой фундамента, нагрузок на сваи и деформаций оснований с расчетными критериями. Для проектирования надежных и экономичных фундаментов важно и в статическом расчете и при определении расчетных критериев учесть влияние образования карстовых деформаций на напряженно-деформированное состояние основания и несущих конструкций.

Статические расчеты фундаментов в условиях значительных неравномерных деформаций, являющихся следствием образования карстовых деформаций, рекомендуется выполнять с учетом жесткости надфундаментной части здания. Оснащенность проектных институтов современными программными комплексами позволяет выполнять расчеты фундаментов при образовании карстовых деформаций как аналитически, так и путем численного моделирования с использованием процедуры МКЭ. Сложность данных расчетов связана не с процедурой расчета, а с высокой степенью неопределенности при задании исходных данных и об основании и о сооружении. При этом большее количество вопросов возникает всегда при моделировании основания с учетом образования карстовых полостей. Учитывая, что геометрические размеры карстовых полостей в карстующихся породах строго не определены, а моделирование процесса карстообразования в основании фундаментов здания не может гарантировать надежность результатов расчета фундаментов, наиболее простым решением в данном

случае является моделирование карстового провала под подошвой фундамента в соответствии с размерами, определяемыми статистико-вероятностными методами. При этом в местах образования провалов грунт "уходит" из под подошвы фундамента, а нагрузка перераспределяется на соседние участки, где обеспечен контакт фундамента с грунтом основания. Моделирование поведения основания при образовании карстовых деформаций под подошвой фундамента возможно как с использованием упруго-пластических моделей основания, так и контактной модели.

1.3 Выбор расчетной модели основания

Расчетная модель основания должна учитывать сложное напряженное состояние покрывной толщи грунта над карстовой полостью и конструктивные особенности здания и фундаментов. Контактная модель основания, или модель переменного коэффициента постели, по сравнению с другими моделями основания является наиболее простой и понятной для инженера-практика, позволяет учесть и неоднородность основания, и его реальную распределительную способность. Использование этой модели в численном моделировании, особенно с учетом взаимодействия здания и основания, позволяет также уменьшить порядок решаемой системы уравнений по сравнению с упругими и упруго-пластическими моделями основания и соответственно снизить погрешности расчета.

Применение упругих моделей грунта типа "линейно-деформируемое полупространство с воронкой у поверхности" для расчетов фундаментов при образовании карстовых деформаций не желательно в связи с тем, что механизм карстообразования обязательно предполагает образование зон пластических деформаций. Практический расчетный опыт российских инженеров-исследователей [Барвашов В.А. и др., 2007, Безволев С.Г., 2012, Готман Н.З., 2008, Давлетяров Д.А., 2012, Петрухин В.П. и др., 2012,] подтверждает эффективность использования в расчетах фундамента при образовании карстовых деформаций комбинированного подхода, основанного на применении упруго-пластической модели грунта для расчета напряжений, деформаций и коэффициентов постели основания.

1.4 Определение расчетных характеристик основания, моделируемого в соответствии с контактной моделью.

Расчет с использованием упруго-пластической модели грунта позволяет определить напряжения и деформации в основании фундамента с учетом заданных форм карстопроявления. Учитывая, что в применяемых расчетных комплексах используется более 10-ти типов моделей упругой и упруго-пластической среды, отличающихся определяющими физическими уравнениями связи между напряжениями и деформациями, а также используемыми прочностными и деформативными характеристиками, важнейшей задачей расчетчика является выбор модели, адекватно отражающей состояние грунта вокруг карстового провала, или над карстовой полостью. Поэтому такие расчеты достаточно трудоемки и требуют высокой

квалификации расчетчика. Практически на каждом объекте должно выполняться исследование НДС основания, что для практического инженера весьма проблематично. В этих условиях наиболее эффективным путем определения коэффициентов постели основания является определение их с применением понижающих коэффициентов к коэффициентам постели, определенным по стандартным методикам без учета образования карстовых деформаций [СП 22.13330.2011, 2011].

При образовании карстовых деформаций по типу “провал”, или “оседание” податливость основания снижается в связи с разуплотнением грунта вокруг провала и увеличением нагрузки на эти участки основания фундаментов в первом случае и в связи с ослаблением основания и разгрузкой на соседние более прочные участки основания во втором. Поэтому специалистами ГУП институт БашНИИСтрой [Готман Н.З., 2007, Рекомендации, 2011] предложено коэффициент постели основания (коэффициент жесткости свай) вокруг карстового провала K_1 определять с понижающими коэффициентами ξ к коэффициентам постели (коэффициентам жесткости свай) за пределами карстового провала K , рассчитываемым по стандартным методикам, т.е. без учета образования карстовых деформаций

$$K_1 = \frac{K}{\xi} \quad (1).$$

Плитный фундамент

Расчет плитного фундамента на закарстованных территориях в соответствии с нормативными документами [СП 22.13330.2011, 2011] как правило выполняется на карстовые деформации по типу “провал”, когда в качестве расчетного параметра карстовых деформаций принимается расчетный диаметр карстового провала. В этом случае коэффициент постели основания в границах карстового провала приравнивается нулю, а за границами снижается в соответствии с рекомендациями НИИОСП им. Н.М. Герсеванова [Рекомендации, 1985].

Для заглубленных зданий с развитой подземной частью такой подход может быть ошибочным и привести к непрогнозируемым деформациям основания и напряжениям в сечениях фундамента в связи с тем, что карстовая полость в карстующихся грунтах может быть большего диаметра, чем карстовый провал, всплывающий в результате обрушения свода полости. При этом в связи с близостью подошвы фундамента к карстующимся грунтам локальное оседание основания над полостью спровоцирует большие усилия в сечениях фундамента, нежели карстовый провал под подошвой фундамента меньшего диаметра. Поэтому в ГУП институт БашНИИСтрой был сформулирован новый подход, отличающийся от нормативного тем, что в качестве расчетного параметра карстовых деформаций принят не расчетный диаметр карстового провала под фундаментом, а расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах (d_p) – это максимальный диаметр карстовой полости, при котором покровная толща грунтов сохраняет устойчивость и

полость не “всплывает” на поверхность в виде провала, но происходит локальное оседание основания над полостью, что характерно для глинистых покровных толщ.

Разработан метод расчета коэффициента постели основания плитного фундамента заглубленного здания [Рекомендации, 2011], предусматривающий введение снижающего коэффициента κ к коэффициенту постели основания, определенному без учета образования полости любыми известными методами,

$$\xi = \frac{h_z - h_k - \alpha \cdot (d_p - 3)}{h_z - h_k + \beta \cdot (d_p - 3)}, \quad (2)$$

где $\alpha = 0,871 - 0,0261 \cdot t$, $\beta = 1,2691 - 0,4163 \cdot t$, t – толщина фундаментной плиты, м; d_p – диаметр полости, м; h_z – глубина расположения кровли карстующихся грунтов, м; h_k – заглубление подземной части здания м.

Зона снижения коэффициента постели R (рис. 1) определяется по формуле

$$R = \sqrt[4]{\frac{16Et^3 \cdot \beta \cdot (d_p - 3) \cdot S}{3P(5 + \mu)(1 - \mu) \cdot (h_z - h_k)}}, \quad (3)$$

где E и μ – модуль деформации и коэффициент Пуассона бетона фундаментной плиты; P – давление в основании фундаментной плиты.

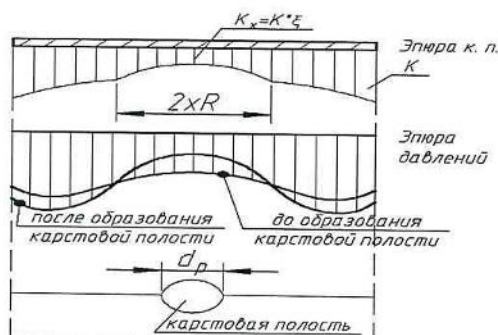


Рис. 1. Коэффициент постели под плитой и эпюра давлений под подошвой фундаментной плиты при образовании карстовой полости расчетного диаметра d_p

Свайно-плитный фундамент

Расчет плитного фундамента на закарстованных территориях в соответствии с нормативными документами [СП 22.13330.2011, 2011] выполняется на карстовые деформации по типу “провал”. При этом коэффициент жесткости свай в границах карстового провала приравнивается нулю, а за границами обычно принимается постоянным, определенным по стандартным методикам, т.е. без учета образования карстового провала.

Учитывая особенности работы свайно-плитного фундамента, а именно эффект обжатия свай в грунте от нагрузки на соседние сваи, возможна ситуация, когда массив грунта, укрепленный сваями, воспринимает напряжения

от карстовых деформаций и карстовая полость под нижними концами свай не развивается до подошвы фундаментной плиты. В этом случае карстовые деформации должны рассматриваться по типу "локальное оседание", а усилия в сечениях плиты и, соответственно армирование плиты, могут быть существенно снижены.

В ГУП институт БашНИИстрой разработан метод расчета коэффициента жесткости свай свайно-плитного фундамента над карстовой полостью под нижними концами свай (рис.2) [Готман Н.З.,2008].

Аналитически определены давления в основании плиты и соответственно осадки плиты над карстовым провалом, рассчитан коэффициент жесткости свай, соответствующий заданному давлению (p), при котором свая «не проскальзывает» в грунте над карстовой полостью заданного диаметра.

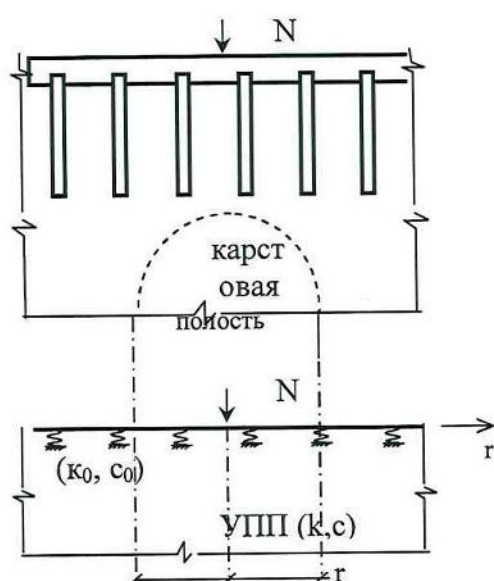
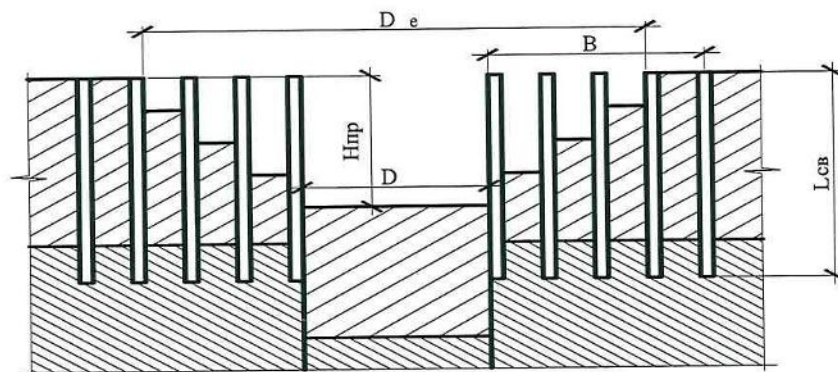


Рис.2.Расчетная схема фундамента над карстовой полостью

Ленточный фундамент

В соответствии с нормативными требованиями расчет ленточного фундамента производится на карстовые деформации типа "провал". При этом в зоне провала, т.е.при расчетном пролете, определенном в соответствии с расчетным диаметром карстового провала, коэффициент постели приравнивается нулю, а у границ провала снижается по рекомендациям НИИОСП им. Герсеванова [Рекомендации, 1985]. При расчете свайного ленточного фундамента в зоне провала коэффициент жесткости свай приравнивается нулю, а за границами этой зоны как правило принимается постоянным, определенным по стандартным методикам, т.е. без учета образования карстового провала.

Учитывая то, что имеются существенные отличия в поведении свай под нагрузкой у границ провала в зависимости от удаленности от провала, в ГУП



институт БашНИИстрой выполнено исследование ленточных фундаментов при образовании карстового провала и предложено определять коэффициенты жесткости свай вокруг карстового провала переменными по формулам 1 и 3 [Готман Н.З., 2007, Давлетяров Д.А., 2012]

$$\xi = 1 + \frac{0.041H_{np}^4}{L_{cb}^2(B^2 + 0.04H_{np}^2)}, \quad (3)$$

где H_{np} – глубина карстовой воронки; L_{cb} – длина сваи; B – расстояние от границы провала до сваи (рис.3).

Рис. 3. Расчетная схема основания свайного фундамента при образовании карстового провала

2. Применение методов расчета в практику проектирования

Экспертная оценка проектных решений фундаментов на закарстованных территориях показывает, что на практике расчеты выполняются преимущественно путем математического моделирования фундаментов совместно со зданием. Все несущие конструкции моделируются либо пластинчатыми, либо стержневыми элементами со своими жесткостями и межэлементными связями в соответствии с конструктивными особенностями. Модель основания фундаментов – контактная модель, характеризующая величиной изменяющегося в плане коэффициента постели для фундаментов без свай или коэффициента жесткости свай для свайных фундаментов, основание задается связями конечной жесткости.

Исходные данные и расчетные требования при подготовке расчетных моделей и чтении результатов расчета применяются следующим образом:

- расчеты производятся для карстовой деформации по типу «провал» заданным расчетным диаметром или «оседание» с учетом мульды проседания, возможности локального оседания в связи с особенностями конструктивных решений зданий и типов фундамента не рассматриваются;

- основные расчетные требования и расчетные критерии соответствуют описанным в п. 1.1;

- коэффициент постели или коэффициент жесткости свай, характеризующий деформативность основания, приравнивается нулю над

карстовым провалом, а за границами провала он принимается равным коэффициенту до образования провала, при этом снижение деформативности основания на границах провала как правило не учитывается.

К чему приводит такая упрощенная интерпретация деформативности основания и сведение всех расчетов практически только к одному варианту карстовых деформаций?

Многочисленными расчетами фундаментов на естественном основании и свайных фундаментов (ленточных и свайно-плитных) установлено следующее.

1. В расчетах при образовании карстовых деформаций путем математического моделирования жесткость связей, моделирующих основание, приравнивается нулю над провалом, а расчетный пролет фундамента над карстовым провалом принимается равным расчетному диаметру карстового провала. На границах провала жесткость связей рассчитывается без учета образования карстовых деформаций. При этом ширина лент фундамента на естественном основании и количество свай свайного фундамента назначаются из расчета восприятия дополнительных давлений на основание, или нагрузок на сваи, в соответствии с расчетной несущей способностью оснований и свай. Однако при отсутствии методов расчета несущей способности оснований и свай на границах карстового провала в нормативных документах, в практических расчетах, как правило, несущая способность принимается такой же, как и в условиях нормальной эксплуатации, т.е. без учета образования карстового провала. Учитывая, что на границах провала грунт разуплотняется, а несущая способность основания и свай снижается, фактический пролет фундамента над провалом увеличивается по сравнению с расчетным. Увеличение фактического пролета фундамента может привести к разрушению ростверка и надфундаментных конструкций. Расчет с учетом обоснованного расчетом снижения жесткости связей у границ провала позволяет учесть увеличение расчетного пролета фундамента, в большей степени включить в работу ростверк и надфундаментные конструкции, а также обоснованно уменьшить размеры фундамента и количество свай.

2. В большинстве случаев наиболее опасным вариантом разрушения основания в связи с карстовой деформацией является карстовый провал под подошвой фундамента, а основным расчетным параметром является расчетный диаметр карстового провала. Исключением являются плитные фундаменты подземных сооружений. В связи с тем, что фундаменты подземного сооружения с заглублением до 10-20 м находятся в непосредственной близости от карстующихся грунтов, кроме расчетов на карстовый провал под подошвой фундамента, должны быть выполнены расчеты на локальное оседание основания над карстовой полостью, при котором напряжения в сечениях фундамента могут быть больше, чем при карстовом провале. Основным расчетным параметром может быть принят расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах, при котором покровная толща грунтов сохраняет устойчивость и полость не "всплывает" на поверхность в виде провала. При этом расчеты должны выполняться с учетом переменного коэффициента постели с понижением его над карстовой полостью. А учитывая

отсутствие хорошо обоснованных методов прогноза расчетных параметров карстовых провалов под фундаментами заглубленных зданий, целесообразно производить расчеты при условии, что за нормативный срок эксплуатации здания полость не вырастет до критических размеров. В этом случае расчеты на образование карстового провала под подошвой фундамента могут не выполняться.

3. Наиболее существенным образом на результаты расчета оказывает влияние расчетные параметры карстовых деформаций. Методы определения этих параметров весьма противоречивы. При увеличении нагрузок на основание с ростом этажности зданий и развития подземных частей здания необходимы новые методы, учитывающие эти факторы.

3. Заключение

1. В связи с отсутствием конкретных рекомендаций по расчету фундаментов на закарстованных территориях практические инженеры выполняют, как правило, расчеты с применением упрощенных подходов к оценке расчетных параметров основания, что в некоторых частных случаях может привести к разрушению фундамента при образовании карстовых деформаций.

2. По результатам исследований российских специалистов-геотехников разработан ряд предложений расчета фундаментов на закарстованных территориях, повышающих эксплуатационную надежность и снижающих материалоемкость карстозащитных фундаментов, основанных на учете взаимодействия “основание- фундамент-здание” в расчете на образование карстовых деформаций. Однако остается практически неизученным вопрос определения несущей способности основания фундаментов у границ карстового провала, что снижает надежность выполняемых расчетов.

3. Для повышения эксплуатационной надежности и экономичности проектов на закарстованных территориях необходимо активнее внедрять результаты исследований в практику расчетов фундаментов на закарстованных территориях путем разработки нормативных документов, по типу СТО предприятия, с рекомендациями по расчету несущих конструкций зданий на карстовые деформации.

4. Важнейшим вопросом расчета фундаментов на закарстованных территориях является определение расчетных параметров карстовых деформаций и расчетного пролета фундамента. В связи с серьезными трудностями прогноза этих параметров, требующего высокой квалификации инженера-геолога и геотехника, такие расчеты должны выполняться только специализированными организациями.

Список литературы

Барвашов В.А., Заматов П.В. К расчету фундаментов на закарстованном основании // ПНИИС, Геориск, декабрь, 2007.

Безволев С.Г. Проектирование карстозащитный фундаментов высотного здания // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на

карстоопасных территориях. Сб. тр. Российской конференции с международным участием.– Уфа, 2012.

Готман Н.З. Расчет противокарстовых фундаментов зданий и сооружений // Основания и фундаменты, 2008.

Готман Н.З., Каюмов М.З. Численное моделирование роста карстовой полости в карстующихся грунтах // Известие вузов «Строительство», 2011, №5.

Готман Н.З. Проблемы проектирования фундаментов на закарстованных территориях. Труды конференции посвященной 50-летию РОМГиФ «Российская геотехника – шаг в XXI век», Том 2 – Москва, 2007.

Давлетьяров Д.А. Расчет коэффициента жесткости свай свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях. Сб. тр. Российской конференции с международным участием. – Уфа, 2012.

Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Толмачев В.В., Безволев С.Г., Мозгачева О.А. Карстологические аспекты проектирования и строительства зданий и сооружений жилого микрорайона в Павшинской пойме // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях. Сб. тр. Российской конференции с международным участием. – Уфа, 2012, с.90-101. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях // НИИОСП-М., 1985.

СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений, М., 2011.

Рекомендации по проектированию фундаментов зданий с развитой подземной частью на закарстованных территориях // ГУП институт БашНИИстрой, Уфа, 2011.

Толмачев В.В., Леоненко М.В., Махнатов С.А., Уткин М.М. Использование понятия карстового риска при инженерно-строительном освоении закарстованных территорий // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях. Сб. тр. Российской конференции с международным участием.– Уфа, 2012.

Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы «простого» типа: полевые исследования // ПНИИС, Инженерная геология, декабрь, 2009.