

**Голубева Мария Олеговна**, магистрант,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,

**Сафиуллин Марат Нуритдинович**, ст. преподаватель,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ВЕРОЯТНОМ РАЗВИТИИ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК**

**Аннотация.** В статье рассматриваются принципы вариантного проектирования фундаментных плит на карстоопасных территориях. На примере карстовых воронок диаметром 5,3 м и 6,0 м выполнен сравнительный анализ коэффициентов использования несущей способности и расхода арматуры. Показано, что увеличение диаметра воронки на 13% приводит к значительному перераспределению усилий и росту материалоемкости конструкции.

**Ключевые слова:** Вариантное проектирование, карстовые воронки, фундаментная плита, коэффициент использования, несущая способность, расход арматуры, карстоопасные территории.

Проектирование фундаментов на карстоопасных территориях представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета вероятности образования подрабатываемых полостей. Карстовые процессы характеризуются непредсказуемостью возникновения и развития, что обуславливает необходимость применения специальных подходов к проектированию, в том числе вариантного анализа конструктивных решений.

При выявлении карстовой опасности в основании проектировщики должны руководствоваться следующими принципами:

- принцип «перекрытия пролета» – конструкция фундамента должна быть способна работать как «мост» или «балка», перекрывающая возможную полость, с образованием новой системы опирания по краям воронки;
- учет кинематического воздействия: расчет должен учитывать не только статическую нагрузку, но и возможное обрушение грунта в полость, вызывающее динамические эффекты;
- обеспечение пространственной жесткости – предпочтение отдается пространственным конструкциям (плитам, перекрестным лентам), способным перераспределять усилия;
- нормируемый запас прочности: согласно СП 22.13330.2016 [1] и СП 20- 13330.2016 [2] конструкции на карстоопасных территориях должны рассчитываться на особое сочетание нагрузок с проверкой по предельным состояниям.

Для проведения анализа принята монолитная железобетонная фундаментная плита толщиной 600 мм, опирающаяся на упругое основание.

Расчеты проведены в программном комплексе SCAD, реализующем метод конечных элементов (МКЭ), с учетом нелинейной работы бетона и арматуры. Рассмотрены три сценария:

- сценарий 1: отсутствие карстовой полости (фоновая ситуация);
- сценарий 2: наличие карстовой воронки диаметром 5,3 м;
- сценарий 3: наличие карстовой воронки диаметром 6,0 м. Основными сравниваемыми параметрами выступили:
  - максимальные коэффициенты использования (КИ) несущей способности по изгибающим моментам (M) и поперечным силам (Q);



- суммарный расход арматурной стали ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) в плите.

Результаты расчета коэффициентов использования представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Максимальный КИ по изгибающему моменту ( $M$ )	0,65	0,95	1,25*
Максимальный КИ по изгибающему моменту ( $Q$ )	0,85	0,45	0,4
Критическое состояние	Поперечная сила	Изгибающий момент	Изгибающий момент

\*Превышение допустимого значения – требуется усиление.

Анализ результатов:

- без карста (сценарий 1) – конструкция находится в рабочем состоянии. Наибольшую опасность представляют концентрации напряжений в зонах примыкания стен и колонн, что выражается в высоком КИ по поперечной силе ( $Q=0,85$ );
- при карсте  $d=5,3$  м (сценарий 2) – наблюдается кардинальное перераспределение усилий. Конструкция начинает работать как балка, перекрывающая пролет. Это приводит к резкому росту изгибающих моментов в середине пролета (КИ по  $M$  возрастает до 0,95), делая их доминирующим фактором. При этом поперечные силы на опорах этой «балки» оказываются ниже исходных (КИ по  $Q$  снижается до 0,45);
- при карсте  $d=6,0$  м (сценарий 3) – увеличение пролета всего на 0,7 м (13%) приводит к качественному изменению состояния. КИ по изгибающему моменту превышает единицу, что свидетельствует об исчерпании несущей способности плиты в текущей конфигурации. Требуется изменение конструкции (увеличение толщины, повышение класса бетона, усиление армирования).

Для обеспечения несущей способности в каждом из сценариев был выполнен расчет требуемого армирования. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Расход арматуры, $\text{кг}/\text{м}^3$	120	185	245
Относительный рост расхода, %	0	+54	+104

Анализ результатов:

- переход от фоновых условий к работе над воронкой диаметром 5,3 м требует увеличения расхода арматуры более чем на 50%. Это связано с необходимостью восприятия значительных изгибающих моментов;
- дальнейшее увеличение диаметра воронки до 6,0 м приводит к удвоению расхода арматуры по сравнению с базовым вариантом. Рост нелинейный, так как изгибающий момент в балке растет пропорционально квадрату пролета.

Наличие и диаметр карстовой воронки являются критическими параметрами, коренным образом меняющими работу фундаментной плиты. При вариантовом проектировании именно эти факторы должны быть положены в основу анализа. Образование карстовой полости



приводит к смене доминирующего вида усилия с поперечной силы на изгибающий момент. Это необходимо учитывать при выборе методов усиления и конструирования.

Конструкция демонстрирует высокую чувствительность к увеличению диаметра воронки. Увеличение пролета с 5,3 м до 6,0 м (на 13%) приводит к превышению несущей способности и требует значительного (в 2 раза) увеличения расхода арматуры для его компенсации.

Вариантное проектирование позволяет количественно оценить стоимость обеспечения карстовой устойчивости. В данном случае защита от воронки диаметром 6,0 м оказывается вдвое дороже по материалу, чем от воронки 5,3 м. Это создает основу для принятия риск-ориентированных решений, например, о целесообразности мероприятий по закреплению грунта для ограничения возможного диаметра провала.

При проектировании фундаментов в карстоопасных районах обязателен вариантный расчет с рассмотрением нескольких сценариев образования воронок. Полученные зависимости «диаметр воронки – коэффициент использования – расход материалов» позволяют оптимизировать конструкцию, найти баланс между надежностью и экономической эффективностью.

*Список литературы:*

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – Введ. 17.06.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 220 с.
2. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Введ. 04.06.2017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 95 с.

