

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-343-349

МЕХАНИЗМ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ФУНДАМЕНТОМ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Д. В. Еременко, Д. А. Калафатов

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь, Республика Крым, Россия

Аннотация. Предложен постановочно-аналитический вариант усиления грунтового основания под фундаментом мелкого заложения с помощью замкнутой полимерной оболочки, расположенной в грунте. Фундамент опирается на грунтовую зону, заключенную внутри оболочки, а эффект усиления связывается с ограничением боковых деформаций грунта, повышением пространственной связанности прифундаментной зоны и изменением схемы передачи нагрузки на основание. Сформулированы расчетные предпосылки, приведены иллюстративные графики и таблицы, отражающие ожидаемое влияние замкнутого контура на осадку и распределение контактных напряжений. Показано, что основное действие оболочки должно интерпретироваться как изменение напряженно-деформированного состояния основания.

Ключевые слова: фундамент мелкого заложения; грунтовое основание; полимерная оболочка; усиление основания; контактные напряжения; осадка; замкнутый контур; геосинтетические материалы

MECHANISM OF SOIL FOUNDATION REINFORCEMENT BENEATH A SHALLOW FOUNDATION BY MEANS OF A CLOSED POLYMER SHELL

D. V. Eremenko, D. A. Kalafatov

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

Annotation. The article proposes a conceptual and analytical approach to reinforcing the soil base beneath a shallow foundation using a closed polymer shell placed in the ground. The foundation rests on a soil zone enclosed within the shell, while the reinforcing effect is associated with the restriction of lateral soil deformations, an increase in the spatial integrity of the near-foundation zone, and a change in the load-transfer scheme to the base. Design assumptions are formulated, and illustrative graphs and tables are presented, reflecting the expected influence of the closed contour on settlement and the distribution of contact stresses. It is shown that the main action of the shell should be interpreted as a change in the stress-strain state of the foundation soil.

Keywords: shallow foundation; soil base; polymer shell; soil reinforcement; contact stresses; settlement; closed contour; geosynthetic materials

Введение

Повышение несущей способности и снижение деформативности оснований остаются одними из наиболее востребованных направлений в современной геотехнике. Для фундаментных систем на податливых и неодно-

родных грунтах большое значение имеет не только площадь подошвы и глубина заложения, но и характер перераспределения напряжений в пределах прифундаментной зоны [1, 3]. В отечественной научной школе идея локального усиления основания развивалась в нескольких направлениях: через совершенствование расчетных моделей основания, устройство армированных фундаментных подушек, применение грунтовых свай в оболочках из геосинтетических материалов и исследование оболочечных решений для песчаных подушек [2, 4–8].

Особый интерес представляет статья Ю. Н. Мурзенко и Г. М. Борликова, в которой были представлены экспериментальные исследования фундамента с песчаной подушкой в цилиндрической оболочке [4]. Авторы показали, что наличие замкнутой оболочки способно существенно изменить работу основания: ограничить боковой распор грунта, уменьшить осадку и повысить воспринимаемую нагрузку. Вместе с тем в опубликованной работе в качестве модели оболочки использовался металлический контур. Для современного строительства более перспективным представляется переход к полимерным материалам, обладающим коррозионной стойкостью, технологичностью и меньшей массой [5, 6].

В настоящей статье предлагается научно-постановочная версия такого решения: фундамент мелкого заложения укладывается сверху на грунтовую зону, заключенную в замкнутый полимерный контур. Такой подход позволяет сохранить ключевую механическую идею ранних исследований [4], но перенести ее на более современный конструктивный прототип.

Конструктивная схема и рабочая гипотеза

Рассматривается фундамент мелкого заложения, опирающийся на грунт внутри замкнутой полимерной оболочки колодезного типа. Оболочка заглубляется в основание на расчетную глубину и формирует ограниченный контур усиленной зоны. Фундаментный элемент располагается сверху на поверхности этой зоны и непосредственно не охватывается оболочкой. В качестве материала оболочки в постановке может быть принят полиэтилен низкого давления либо полипропилен, обладающий достаточной химической стойкостью и эксплуатационной долговечностью в грунтовой среде [5, 6].

Рабочая гипотеза: замкнутый полимерный контур ограничивает боковые деформации грунта в наиболее напряженной зоне, за счет чего грунтовое ядро внутри оболочки работает как более связанный локальный массив. Данный эффект следует понимать, как изменение пространственного пути передачи нагрузки и, следовательно, изменение напряженно-деформированного состояния основания.

На рис. 1 приведена предлагаемая конструктивная схема. Замкнутый контур расположен в грунте и охватывает усиленную зону основания. Верхняя граница оболочки располагается ниже подошвы фундамента.

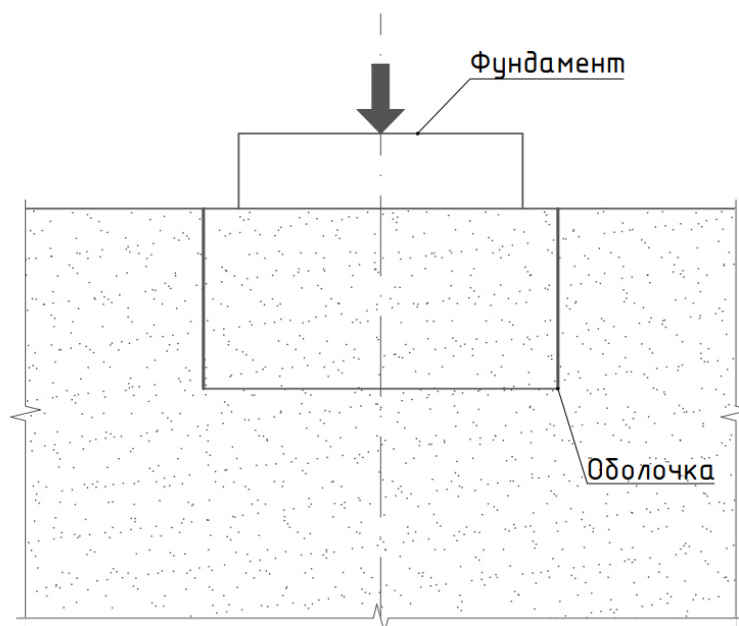


Рис. 1. Конструктивная схема основания, усиленного замкнутой полимерной оболочкой, под фундаментом мелкого заложения

Основные механические предпосылки

Согласно классическим положениям механики грунтов, осадка фундамента определяется не только величиной внешней нагрузки, но и характером распространения напряжений в основании, развитием зон предельного состояния, а также возможностью боковых деформаций грунтового массива [1, 9]. В упрощенных расчетных моделях основание обычно рассматривается как локально деформируемая среда, тогда как в более развитых постановках учитывается пространственная взаимосвязь деформаций соседних участков грунта [2]. Для рассматриваемой схемы принципиальное значение имеет то обстоятельство, что замкнутый контур оболочки изменяет граничные условия деформирования грунта в прифундаментной зоне.

При опирании фундамента на грунт, заключенный в пределах замкнутого контура, значительная часть вертикальной нагрузки воспринимается локальным грунтовым ядром, боковые деформации которого ограничиваются стенками оболочки. Вследствие этого внутри контура может формироваться более благоприятное напряженно-деформированное состояние по сравнению с естественным основанием, не имеющим бокового ограничения. Близкий по физическому смыслу эффект отмечен в отечественных исследованиях грунтовых свай в оболочках из геосинтетических материалов, где внешняя оболочка воспринимает кольцевые растягивающие усилия и обеспечивает радиальную поддержку грунтового элемента [5, 6].

Сопоставление с результатами исследований армированных фундаментных подушек также показывает, что ограничение бокового распора грунта и связанное с этим изменение схемы распределения вертикальных напряжений относятся к числу определяющих факторов повышения эффективности основания [7, 8]. В связи с этим замкнутую полимерную оболочку в рамках рассматриваемой постановки следует рассматривать не как самостоятельный несущий элемент, а как конструктивное средство локального структурирования и упрочнения прифундаментной зоны.

Таблица 1. Факторы, определяющие эффективность усиления основания замкнутой полимерной оболочкой

Фактор	Механическое влияние	Ожидаемое следствие
Глубина оболочки	Определяет объем ограниченного грунтового ядра	Изменение степени локального усиления
Диаметр контура	Влияет на площадь усиленной зоны	Изменение зоны перераспределения напряжений
Жесткость материала оболочки	Определяет степень ограничения боковых деформаций	Влияние на осадку и форму контактной эпюры
Свойства грунта внутри контура	Определяют деформативность локального ядра	Изменение общего эффекта усиления
Свойства окружающего грунта	Влияют на передачу напряжений за пределы контура	Изменение работы системы в целом

Иллюстративная оценка влияния контура на осадку

Для качественной оценки влияния замкнутого контура на осадку введем безразмерную зависимость

$$\frac{s}{s_0} = \frac{1}{1 + \lambda},$$

где s_0 — осадка фундамента без оболочки; s — осадка при наличии оболочки; λ — обобщенный параметр замкнутого контура, отражающий совместное влияние глубины оболочки, ее относительной жесткости и качества ограничения боковых деформаций.

Таблица 2. Расчетные значения для построения зависимости $s/s_0 = 1/(1 + \lambda)$

λ	s/s_0
0	1,000
0,5	0,667
1	0,500
1,5	0,400
2	0,333
2,5	0,286
3	0,250

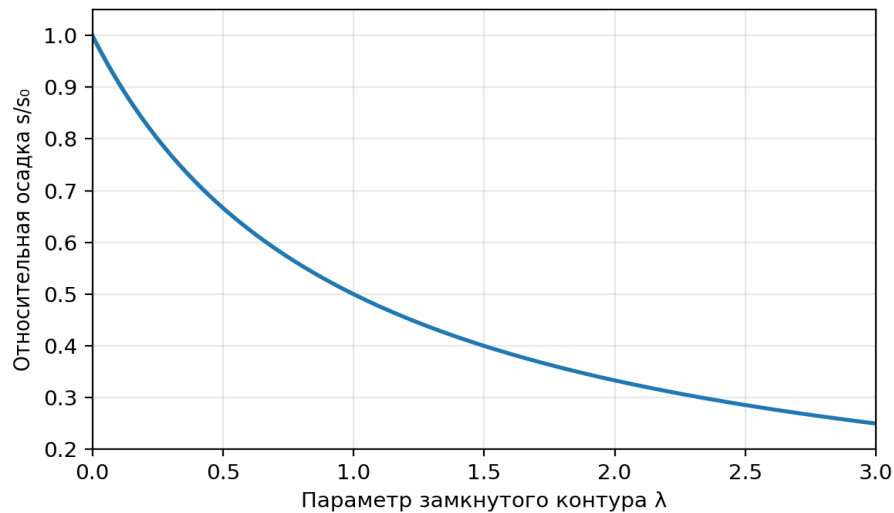


Рис. 2. Иллюстративная зависимость относительной осадки s/s_0 от параметра усиления λ

Представленный график носит расчетно-аналитический характер и отражает общую тенденцию уменьшения осадки системы при ограничении боковых деформаций и структурировании грунта внутри замкнутого контура оболочки.

Иллюстративная оценка влияния оболочки на контактные напряжения

Второй иллюстративный результат касается контактных напряжений под подошвой. Без оболочки эпюра давления в податливом основании обычно более неравномерна: в краевых зонах возможны повышенные значения давления. При наличии замкнутого контура, ограничивающего боковые перемещения грунта, распределение напряжений становится более сглаженным.

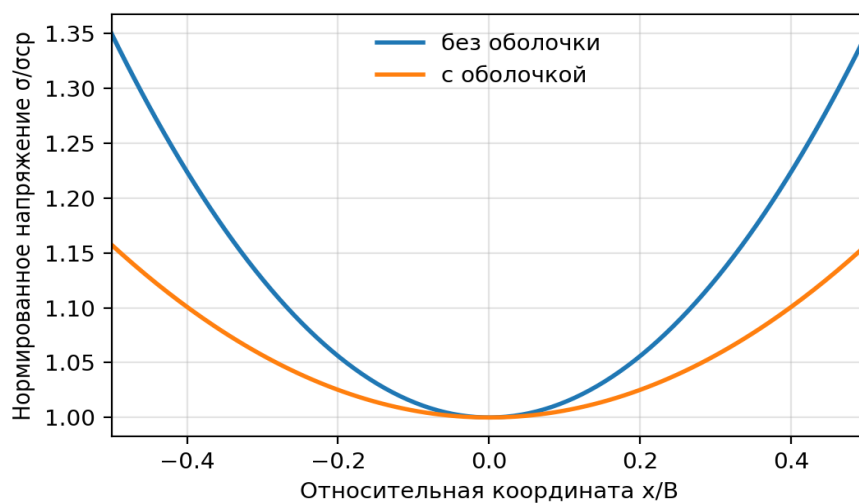


Рис. 3. Нормированные эпюры контактных напряжений по подошве фундамента без оболочки и при наличии оболочки

Рис. 3 предназначен для качественного сопоставления двух вариантов работы основания. Для случая без оболочки принята симметричная эпюра контактных напряжений с повышением ординат в краевых зонах подошвы, что отражает более выраженную неравномерность распределения давления. Для случая с оболочкой амплитуда указанной неравномерности уменьшена, что соответствует предполагаемому перераспределению нагрузки вследствие ограничения боковых деформаций грунта в пределах замкнутого контура.

Заключение

Полученные расчетно-аналитические схемы позволяют сформулировать несколько принципиальных положений. Во-первых, влияние оболочки следует трактовать не как простое приращение несущей способности за счет прочности полимерного элемента, а как изменение механизма деформирования основания и пути передачи нагрузки. Во-вторых, для рассматриваемой конфигурации определяющими являются не только модуль и толщина полимерного материала, но и геометрическая замкнутость контура, обеспечивающая сопряжение боковых участков ограниченной зоны грунта. В-третьих, ожидаемый эффект должен существенно зависеть от типа грунта: чем выше податливость и неоднородность прифундаментной зоны, тем заметнее может проявляться сглаживание контактной эпюры и уменьшение осадки.

Практическая перспектива предлагаемого решения состоит в возможности перехода от металлических и железобетонных оболочек, исследованных ранее, к более легким и технологичным полимерным конструкциям. При этом ключевой научной задачей становится определение минимально достаточной жесткости оболочки и рациональной глубины ее заглубления для конкретных инженерно-геологических условий.

На основе анализа ранних экспериментальных исследований фундаментов с песчаной подушкой в цилиндрической оболочке [4] и современных работ по геосинтетическим оболочкам [5, 6] предложена постановка задачи усиления основания под фундаментом мелкого заложения замкнутой полимерной оболочкой. Основной эффект оболочки связан с ограничением боковых деформаций грунта, повышением пространственной связанности локального грунтового ядра и изменением распределения контактных напряжений. Иллюстративные графики показали, что в пределах предложенной нормированной модели влияние замкнутого контура может быть связано со снижением относительной осадки и сглаживанием контактной эпюры под подошвой фундамента. Для перехода к инженерным рекомендациям необходимы физические модельные испытания и численное моделирование, учитывающие геометрию оболочки, свойства полимерного материала и нелинейное поведение грунтового основания.

Список источников

1. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
2. Пастернак, П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М.: Госстройиздат, 1954. – 56 с.
3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. М.: Минстрой России, 2016.
4. Мурзенко Ю. Н. Экспериментальные исследования фундамента с песчаной подушкой в цилиндрической оболочке / Ю. Н. Мурзенко, Г. М. Борликов // Экспериментальные исследования инженерных сооружений: материалы II симпозиума (Ленинград, 1969 г.). – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1969. – С. 124-134.
5. Огаркова, М. М. Применение грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях города Перми / М. М. Огаркова, Р. И. Шенкман // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2014. – № 4. – С. 39-48.
6. Шенкман, Р. И. Метод расчета осадок фундаментов на основании, улучшенном с использованием вертикальных грунтовых элементов в оболочках из геосинтетических материалов / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11. – № 3. – С. 64-76.
7. Татьянников, Д. А. Натурные штамповые испытания армированных фундаментных подушек / Д. А. Татьянников, А. Б. Пономарев, С. В. Калошина // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 164-175.
8. Татьянников, Д. А. Численное моделирование работы конструкций армированных фундаментных подушек / Д. А. Третьяков // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 4. – С. 104-116.
9. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K. Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand // Geotextiles and Geomembranes. – 2001. – Vol. 19, – no. 4. – P. 235-256.
10. Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 549 p.

© Еременко Д.В., Калафатов Д.А., 2026