

## **УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ФУНДАМЕНТОВ КРУПНЫХ СИЛОСОВ**

Бутенко А.А.  
ООО «ТРАНС СТРОЙ КОМПЛЕКС»

Кичаева О.В.  
Харьковский национальный университет городского хозяйства  
им. А.Н. Бекетова  
г. Харьков, Украина

**АНОТАЦІЯ:** В статті розглянуто питання проектування фундаментів та конструктивні рішення плоскодонних силосів збільшених діаметрів. Запропоновано способи управління напружено-деформованим станом системи «силос – фундамент – основа» шляхом вибору раціональної конструкції фундаменту, а також створенням попереднього напруження.

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассмотрены вопросы проектирования фундаментов и конструктивные решения плоскодонных силосов увеличенных диаметров. Предложены способы управления напряженно-деформированным состоянием системы «силос – фундамент – основание» путем выбора рациональной конструкции фундамента, а также созданием предварительного напряжения.

**ABSTRACT:** The article studies the issues of foundation engineering and structural decisions for large diameter flat-bottom silos. It offers methods of stress-deformed state control in «silo – foundation – base» system via foundation rational design selection and prestrain creation.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плоскодонные силоса, предварительное напряжение; управление состоянием, деформированная схема

### **ВВЕДЕНИЕ**

Стремительное развитие агропромышленного комплекса Украины обуславливает массовое строительство объектов для хранения зерновых. Наиболее эффективным и распространенным является хранение зерновых

в силосах с плоским днищем диаметром свыше 40 м. Объем хранимого товара одного такого силоса составляет до 30 тыс. м<sup>3</sup>. Фундаменты таких силосов весьма нагружены и велики в плане.

Проектирование крупных и нагруженных фундаментов имеет свои особенности, как с точки зрения строительных конструкций, так и с точки зрения механики грунтов. Напряженно-деформированное состояние и деформационная схема работы фундаментов силосов зависит от многих факторов:

- характеристик основания и наличия негативных факторов (суффозия, просадка, карст, подтопление, ошибки в проекте и во время строительства);
- величины действующих нагрузок;
- размеров фундамента в плане и жесткостных характеристик;
- типа выгрузки (боковая выгрузка или наличия подземной галереи или подсилосного этажа).

Обычно теоретический расчет фундамента круглого плоскодонного силоса выполняется, как для круглой плиты сложного сечения, лежащей на упругом основании.

Несущая способность и отпор грунта обеспечиваются не только силами трения и силами сцепления грунтов, но и состоянием поровой воды трехфазных грунтов. Чрезмерные деформации и многократные нагружения, свойственные режиму эксплуатации силосов, приводят к разрушению грунтов на этапе их консолидации.

Поскольку для больших плитных фундаментов сжимаемая толща грунтов, активно участвующая в осадке фундамента, составляет ориентировочно 15...20 м, то зачастую в составе такой толщи залегают различные по своим характеристикам грунты и принятие осредненного значения модуля деформации и постоянного коэффициента постели упругого основания при расчете не обоснованно.

Таким образом, сформировавшийся на сегодня подход к проектированию фундаментов крупных силосов не позволяет оценить реальную картину напряженно-деформированного состояния системы «силос – фундамент – основание». Поэтому актуальным является вопрос о создании адекватной методики оценки напряженно-деформированного состояния данной системы, учитывающей совместную работу всех элементов и их взаимное влияние.

Действующие на территории Украины нормы ограничивают осадку фундаментов металлических силосов до 15 см [1]. Обеспечить нормативную осадку фундамента диаметром до 40 м и более не всегда представляется возможным без дополнительных существенных мероприятий по усилению или замене грунтов.

Теория линейно-деформируемой среды для абсолютно жесткого штампа, нагруженного равномерно-распределенной нагрузкой предлагает такое решение, при котором значения напряжений под подошвой фундамента максимальны по периметру и минимальны по центру фундамента. Но реальный грунт не может воспринимать бесконечные напряжения, поэтому он теряет несущую способность и происходит перераспределение напряжений по контакту. Согласно экспериментальным данным, фактические напряжения под краями фундамента значительно меньше теоретических, а сам вид эпюр зависит от величины нагрузки, размеров фундамента и свойств грунта.

Особенности конструкции фундаментов плоскостных силовых больших диаметров и характер их нагружения, в свою очередь, определяют ускорение перехода к фазе нелинейной деформации с формированием зон предельного равновесия и достижения предельного краевого давления. Дальнейшие деформации основания обуславливают формирование уплотненного грунтового ядра, которое «расклинивает» массив грунта. При этом наблюдается ярко выраженная неравномерность распределения напряжений под центральной и крайней частями фундамента силового. Особенно неравномерность выражена для фундаментов с подземной галереей (рис. 4), поскольку последние обладают большей гибкостью, чем фундаменты с подсиловым этажом (рис. 2).

Используемые теории и методы расчета дают различные результаты. Так, например, оценка напряженно-деформированного состояния с точки зрения Еврокод 7 [2] сильно отличается от действующих норм проектирования Украины, России, Белоруссии [3].

Решение данной задачи с помощью метода конечных элементов (МКЭ) дает различные результаты. Анализ результатов расчетной схемы на упругом основании в виде однородного коэффициента постели не дает адекватной оценки. Моделирование фундамента на упругом полупространстве из объемных конечных элементов показывает более реальную картину, но не учитывает работу грунтов в пластической стадии с учетом реологических свойств грунтов.

В настоящее время выполнены работы по разработке методик расчета осадок и оценки напряженно-деформированного состояния оснований с применением теории консолидации, с учетом реологических свойств грунтов, численных методов на основании теории пластичности и ползучести [4 – 5]. Математические модели на основе теории наследственной ползучести, которая включает в себя другие теории, базируются на линейных реологических моделях. Разработаны приближенные аналитические методы исследования нелинейного деформирования неоднородного грунтового основания.

В реальности геодезическим мониторингом при слежении за осадками силосов фиксируются прогибы центральной части фундамента. Такая картина абсолютно противоположна решению задачи плиты на упругом основании с постоянным коэффициентом постели. Данные геодезического мониторинга осадок свидетельствуют о том, что реальную деформированную схему определяют деформации основания.

Анализ аварий силосов показывает, что реальная деформированная схема исследуемых фундаментов отличалась от предполагаемой проектировщиком и представляла собой абсолютную противоположность. Соответственно, предусмотренное проектом армирование фундамента не отвечало реальной работе конструкции.

**Цель исследования.** В связи с вышеизложенным, необходима разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния системы «силос – фундамент – основание» в сложных инженерно-геологических условиях. Данная методика позволит верно оценить напряженно-деформированное состояние указанной системы и предложить наиболее оптимальные и экономичные конструктивные решения фундаментов силосов на стадии проектирования, а также решения по усилению.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что прогиб фундамента на момент трещинообразования ориентировочно составляет  $1/500$  его диаметра. Представляется возможным создавать предварительный выгиб фундамента силоса увеличенного диаметра на аналогичную величину путем предварительного напряжения арматуры. Таким образом, возможно управление напряженно деформированным состоянием системы.

Управление напряженно-деформированным состоянием системы «силос – фундамент – основание» также возможно путем формирования опорной поверхности фундамента, как при выборе оптимальной конструкции фундамента, так и при его возможном усилении.

Ранее были разработаны и реализованы решения по усилению фундаментов с применением предварительно напряженной арматуры и предварительным обжатием грунта Страбахиным Н.И. [7]. Способ усиления с обжатием грунта позволяет нивелировать эпюру давления под подошвой фундамента путем включения в работу дополнительной площади по периметру фундамента. Реализовано усиление с помощью предварительно напряженных шпренгельных затяжек [6], а также локального предварительного напряжения [8] свободно опертых и неразрезных строительных конструкций. Управление напряженно-деформированным состоянием больших и, как правило, гибких фундаментов осложнено выявлением ре-

альной картины распределения напряжений и значений осадок грунтов основания.

Для создания предварительного напряжения и управлением напряженно-деформированным состоянием предлагается использовать внешнее армирование шпренгельного (рис. 1) и кольцевого типа (рис. 3) с натяжением арматуры на бетон.

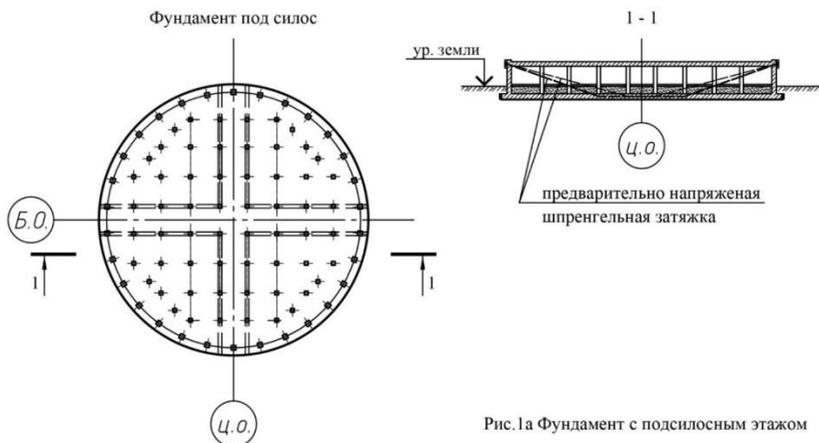


Рис. 1а Фундамент с подсилосным этажом

Рис. 1. Фундамент с подсилосным этажом

Устройство кольцевого предварительного напряжения целесообразно для повышения трещиностойкости внешнего периметра фундамента. Его применение будет эффективным в нижней части фундамента с обжатием ленточной части фундаментов с подсилосной галереей (рис. 3). Усилие кольцевого предварительного напряжения позволяет регулировать напряженно-деформированное состояние наружных стенок фундамента, которые наиболее подвержены образованию трещин.

Предварительно напряженное армирование системой перекрестных ортогональных шпренгелей позволяет управлять общей схемой деформации фундамента, позволяя компенсировать нагрузки центральной части фундамента. При работе шпренгеля возникают усилия, разгружающие центральную часть фундамента и передающие нагрузки на наружный периметр, что позволяет не только увеличить прочность и трещиностойкость конструкции фундамента за счет дополнительного армирования предварительно напряженной арматурой, но и снизить напряжения под подошвой фундамента центральной части. Таким образом, возможно предотвратить образование ядра уплотненного грунта под центральной частью силоса,

что позволит увеличить несущую способность фундамента по грунту за счет распределения напряжений.

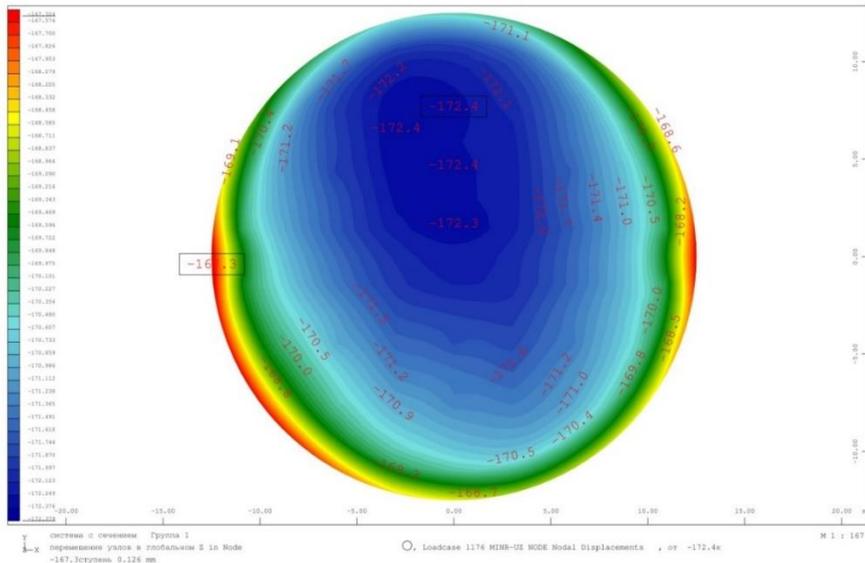


Рис. 2. Осадка фундамента с подсиловым этажом без предварительного напряжения

Натяжение арматуры производится путем поперечной оттяжки с последующей фиксацией арматуры.

Усилия передачи усилий предварительного напряжения на бетон предварительно напряженного одиночного шпренгеля с углом наклона  $\alpha$  ( $15^\circ \dots 35^\circ$ ) составляют:

Горизонтальная реакция закрепления шпренгеля ( $H_x$ ) :

$$H_x = N_{sp} f_0 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha}, \quad (1)$$

где:

- $N_{sp}$  - усилие предварительного напряжения шпренгеля
- $\alpha$  - угол наклона приопорной части шпренгеля от горизонтали
- $f_0$  - коэффициент трения принимаемый 0,45 из экспериментальных данных.

Вертикальная реакция закрепления шпренгеля ( $V_1$ ) :

$$V_1 = 0.825 N_{sp} \tan \alpha \quad (2)$$

В процессе работы фундамента под нагрузкой, вследствие возникающих в шпренгеле дополнительных усилий при осадке центральной части фундамента, также увеличивается значение вертикальной опорной реакции шпренгеля, разгружающей фундамент.

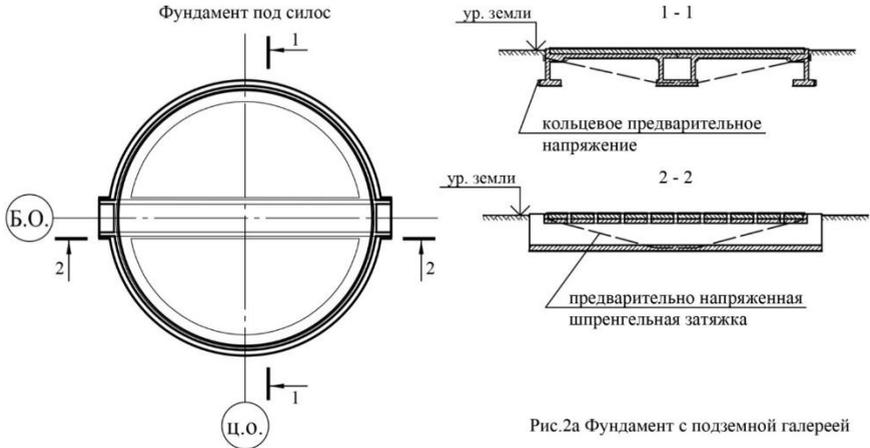


Рис.2а Фундамент с подземной галереей

Рис. 3. Фундамент с подземной галереей

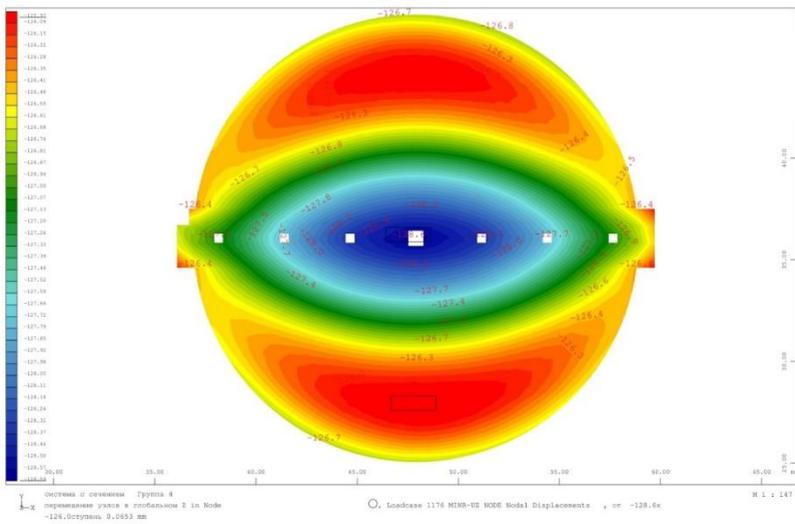


Рис. 4. Осадка фундамента с подземной галереей

## ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, регулирование напряженно-деформированного состояния фундаментов крупных силосов позволяет повысить эффективность использования материалов при строительстве, а также повысить надежность и безопасность эксплуатации при реконструкции ранее возведенных фундаментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-07-01]. – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1998. – 40 с.
2. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила: ТКП EN 1997-1-2009 (02250). – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 121 с.
3. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67-2007. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 136 с.
4. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств / К. Терцаги; пер. с нем. А.А. Черкасов, П.С. Рубан, П.П. Смиринкин; под ред. Н.М. Герсеванова. – Л.: НТКП СССР, 1933. – 39 с.
5. Сеськов В. Определение осадки фундаментов зданий с учетом консолидации грунтовых оснований / Сеськов В., Быховцев В. // Строительная наука и техника. – 2011. – №2. – 90 с.
6. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений / Н.М. Онуфриев. – Л.: Стройиздат, 1965. – 342 с.
7. Страбахин Н.И. Способ усиления фундаментов / Н.И. Страбахин // Бюллетень изобретений. – 1961. – №5 – 52 с.
8. Бутенко А.А. Напряженно-деформированное состояние в приопорных зонах локально предварительно напряженных изгибаемых элементов / Бутенко А.А. // Конференция творческой молодежи. Новые идеи развития бетона и железобетонных конструкций: доклады и труды молодых специалистов. – М.: Джеймс, 2002. – С. 89-94.

### REFERENCES

1. DBN V.2.2-8-98 Predpriyatiya, zdaniya i sooruzheniya po hraneniyu i pererabotke zerna [Grain processing and storage venture, buildings and facilities]. – Kiev: State committee of construction, architecture and housing policy of Ukraine, 1998. – 40
2. Evrocod 7. Geotehnicheskoe proektirovanie. Chast 1. Obschie pravila: TKP EN 1997-1-2009 (02250) [Eurocode 7. Geotechnical engineering. Part 1: General

- rules: TCCP EP 1997-1-2009 (02250)] – Minsk: Ministry of architecture and construction of Republic of Belarus, 2010. – 121
3. Fundamenti plitnyie. Pravila proektirovaniya: TKP 45-5.01-67-2007 [Foundations slabs. Engineering rules: TCCP 45-5.01-67-2007]. – Minsk: Ministry of architecture and construction of Republic of Belarus, 2010. – 136
  4. K. Terzaghi Stroitelnaya mehanika grunta na osnove ego fizicheskikh svoystv [Structural mechanics of soil based on its physical properties] / K. Terzaghi; translation from German. A.A. Cherkasov, P.S. Ruban, P.P. Smirenkin; ed. N.M. Gersevanov. – L.: NTKP USSR, 1933. – 39 p.
  5. Seskov V., Byhovtsev B. Opreделение osadki fundamentov zdaniy s uchedom konsolidatsii gruntovyih osnovaniy [Determination of building foundation yield with account of soil bases consolidation // Construction Science and Engineering. – 2011. – №2 – 90 p.
  6. N.M. Onufriev Usilenie zhelezobetonnykh konstruksiy promyshlennyykh zdaniy i sooruzheniy [Strengthening of reinforced concrete structures of industrial buildings and facilities] / N.M. Onufriev. – L.: Stroyizdat, 1965. – 342 p.
  7. N.I. Strabahn Sposob usileniya fundamentov [Method of foundation shoring] / N.I. Strabahn // Bulletin of Inventions. – 1961. – №5 – 52 p.
  8. Butenko A/ Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v priopornykh zonakh lokal'no predvaritel'no napryazhennykh izgibaemykh ehlementov [Stress-deformed State in Support Zones of Locally Bent Prestrain Elements] // Konferentsiya tvorcheskoy molodezhi. Novyye idei razvitiya betona i zhelezobetonnykh konstruksiy: doklady i trudy molodyih spetsialistov [Creative youth conference. New ideas of concrete and reinforced concrete structures development: Young specialists thesis and reports]. – M.: James, 2002 – p. 89-94.

Статья поступила в редакцию 05.08.2016 г.