

УДК 624.131.23

**А. В. ПИСАРЕНКО, В. В. ЯРКИН**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ПРОСАДОЧНЫМ ОСНОВАНИЕМ ПРИ ЕГО ЧАСТИЧНОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ**

**Аннотация.** В статье исследовано влияние частичного закрепления просадочного грунта на коэффициент жесткости основания и напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций, взаимодействующих с деформируемым основанием. Представлены результаты определения НДС фрагмента бескаркасного здания при различных схемах изменения жесткости основания в плане и выполнен их анализ с определением оптимальной схемы, обеспечивающей допустимый уровень дополнительных усилий, возникающих в строительных конструкциях при реализации остаточных просадочных свойств грунта.

**Ключевые слова:** просадочные грунты, коэффициент жесткости основания, взаимодействие с деформируемым основанием.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Просадочные грунты широко распространены на территории России и Украины. При этом неравномерность деформаций основания при реализации просадочных свойств грунта, как правило, требует применения мероприятий, обеспечивающих нормальные условия эксплуатации строительных объектов. Деформации зданий, возведенных на просадочных грунтах, зачастую связаны с ошибками проектирования, когда нагрузки на грунты определены без учета их просадочности, и могут привести к развитию неравномерных осадок фундаментов, в том числе зданий и сооружений в целом [1, 2]. В соответствии с действующими нормативными документами [3, 4] одним из приоритетных направлений защиты зданий на просадочных грунтах является устранение просадочных свойств грунта путем его уплотнения, закрепления и т. д. В то же время в ряде случаев для обеспечения допустимых значений неравномерных деформаций основания достаточно выполнить частичное устранение просадочных свойств в плане либо по глубине просадочной толщи.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ**

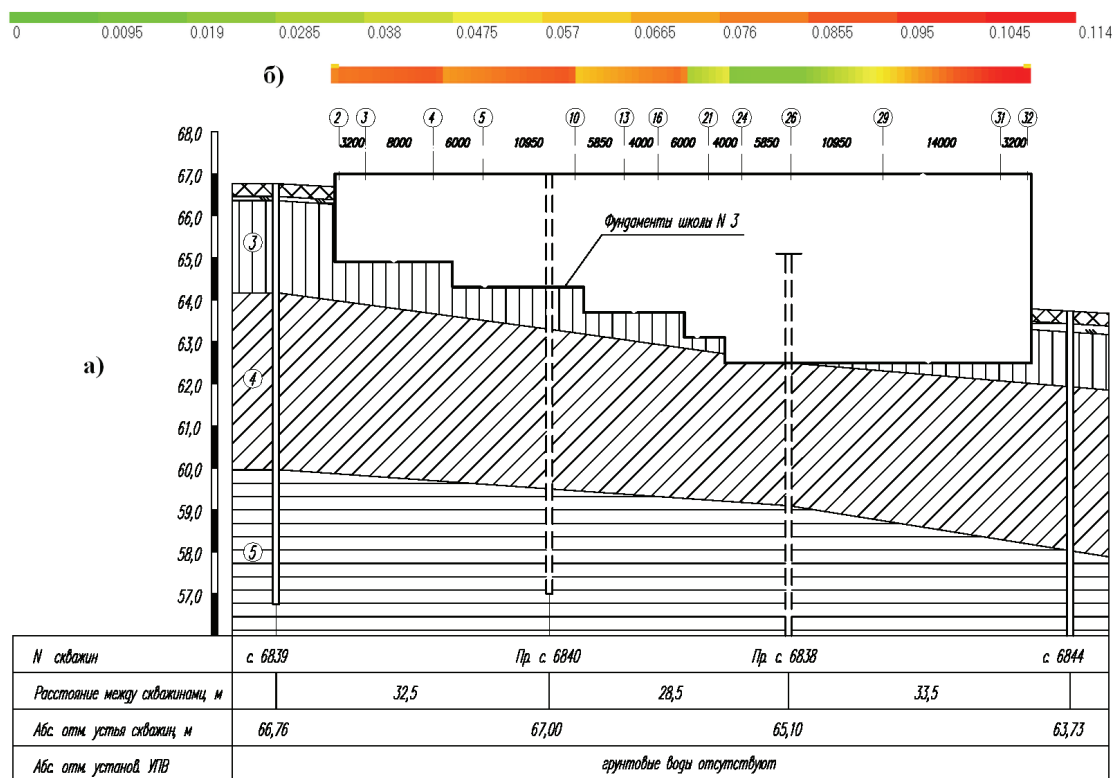
Исследовать возможность снижения дополнительных усилий в конструкциях зданий, эксплуатируемых на просадочных грунтах, путем изменения жесткости основания за счет частичного закрепления просадочного грунта.

**ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Наиболее эффективно применение частичного закрепления просадочного грунта в ситуациях, когда инженерно-геологические условия и конструктивное решение здания способствуют возникновению существенных неравномерных деформаций основания как при относительно равномерном замачивании основания, так и при отсутствии замачивания.

Примером неблагоприятного сочетания инженерно-геологических условий и неудачного конструктивного решения может служить здание школы № 3 в г. Мариуполе. Здание представляет собой трехэтажное бескаркасное здание сложной формы в плане. Несмотря на большую протяженность здания > 70 м и сложную форму в плане в здании отсутствуют деформационные швы. При этом в

связи с большим перепадом рельефа фундаменты имеют различную глубину заложения, в результате чего на небольшом участке они полностью прорезают просадочную толщу (рис. 1). На остальных участках мощность просадочного слоя (ИГЭ-3) под подошвой фундамента изменяется от 0 до 1,2 м. Площадка относится к I типу по просадочности, так как просадки от собственного веса грунта отсутствуют.



**Рисунок 1** – Инженерно-геологический разрез: а) инженерно-геологический разрез вдоль главного фасада школы; б) изополя вертикальных деформаций основания по длине фундамента.

Так как бескаркасное здание школы с кирпичными стенами построено без мер защиты от неравномерных деформаций основания в соответствии с [5, 6] предельные деформации основания для него составляют:

- максимальная осадка – 12 см;
- относительная неравномерность осадок – 0,002.

Максимальные вертикальные деформации основания с учетом просадок от внешней нагрузки составляют 11,4 см и не превышают предельно допустимого значения, однако неравномерность деформаций по длине ленточных фундаментов существенно превышает предельно допустимые значения (рис. 1).

При этом несмотря на небольшую величину просадочных деформаций и даже при равномерном замачивании просадочных грунтов происходит резкая концентрация дополнительных усилий, сопровождающаяся разломом в стенах над участком фундамента, опирающегося на непросадочные грунты.

В данной работе на примере здания школы № 3 в г. Мариуполе исследовалась возможность снижения дополнительных усилий в конструкциях путем изменения жесткости основания за счет частичного закрепления просадочного грунта. При этом решались следующие задачи:

- определение влияния частичного закрепления просадочного грунта по глубине на коэффициент жесткости основания;
- подбор оптимальной схемы изменения жесткости основания в плане, обеспечивающей допустимый уровень неравномерных деформаций основания и соответственно дополнительных усилий, возникающих в строительных конструкциях.

Численные исследования НДС конструкций здания выполнялись методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2013 [7]. Моделирование основания при этом выполнялось с использованием переменного коэффициента жесткости основания по С. Н. Клепикову, определенного в соответствии с [8, 9].

Рассматривались две общепринятые наиболее неблагоприятные схемы локального замачивания просадочного грунта [10]:

- под центром здания (рис. 2а);
- под торцом здания (рис. 2б).

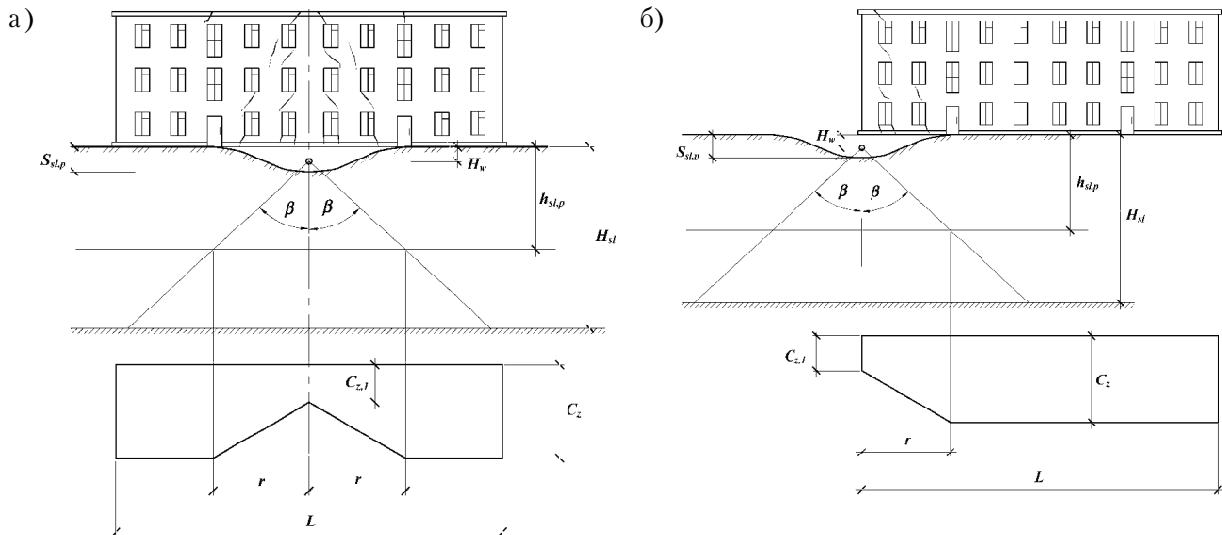


Рисунок 2 – Схемы локального замачивания: а) под центром здания; б) под торцом здания.

Максимальная просадка основания от внешней нагрузки  $s_{sl,p}$  для незакрепленного основания возникает по вертикали, проходящей через источник замачивания. По краям зоны замачивания просадка основания равна нулю. Размеры зоны замачивания определяются по формуле

$$r = (d + h_{sl,p} - H_w) \cdot m_\beta \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

- где  $d$  – глубина заложения подошвы фундамента;  
 $h_{sl,p}$  – зона просадки грунта от внешней нагрузки;  
 $H_w$  – глубина расположения источника замачивания;  
 $\beta$  – угол растекания воды, принят  $50^\circ$  для суглинка;  
 $m_\beta$  – коэффициент, учитывающий возможное изменение угла растекания воды многослойного основания, принят 1,4, так как просадочная толща подстилается грунтом с меньшим коэффициентом фильтрации.

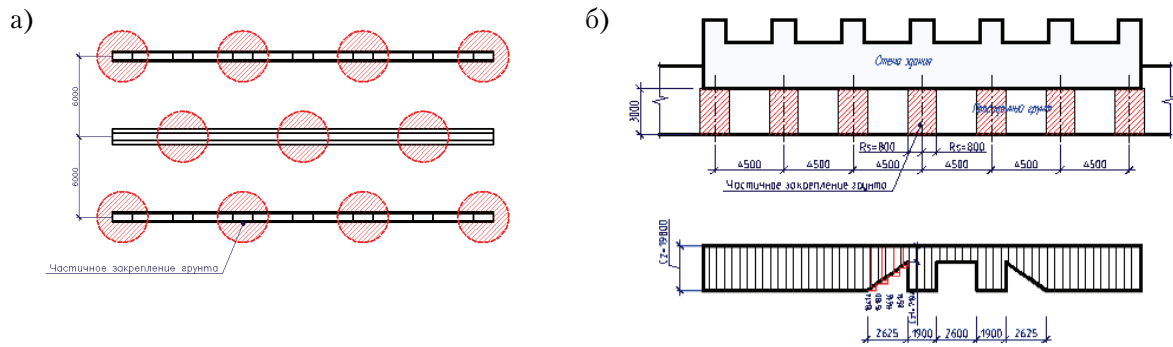
Схемы изменения жесткости основания при местном его замачивании принимались по линейному закону от минимального  $C_{z,1}$  до максимального  $C_z$  значений коэффициентов жесткости, определяемых по формулам:

$$C_z = \frac{P}{s}; \quad C_{z,1} = \frac{P}{s + s_{sl,p}}, \quad (2)$$

- где  $P$  – среднее давление по подошве фундамента;  
 $s$  – осадка основания от внешней нагрузки, определяемая без учета просадочных свойств грунтов как для обычных условий строительства;  
 $s_{sl,p}$  – просадка грунта от внешней нагрузки (в зоне  $h_{sl,p}$ ).

При этом рассматривались следующие варианты частичного закрепления просадочного грунта:

- частичное закрепление основания по глубине на 50, 75 и 100 % просадочной толщ;
- частичное (прерывистое) закрепление основания в плане, преимущественно под простенками, в местах резких перепадов нагрузок и мощности просадочной толщ (рис. 3).

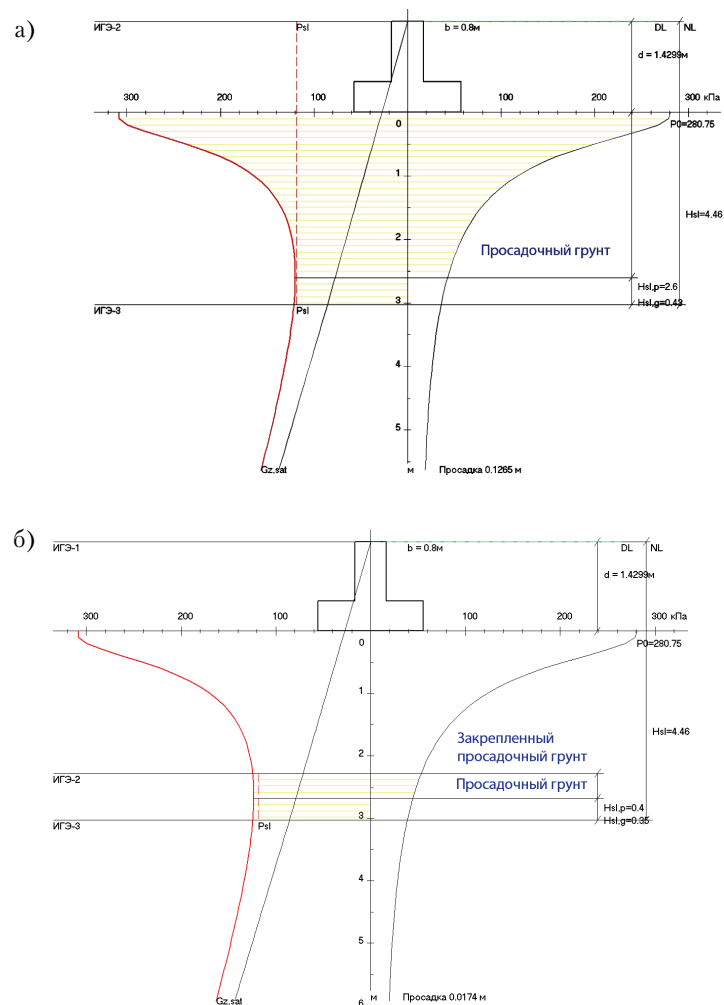


**Рисунок 3** – Расчетная схема частичного (прерывистого) закрепления просадочного грунта на фрагменте здания: а) в плане; б) в разрезе.

Участки закрепленного просадочного грунта моделировались соответствующим изменением коэффициента жесткости основания, определенного по формуле 2.

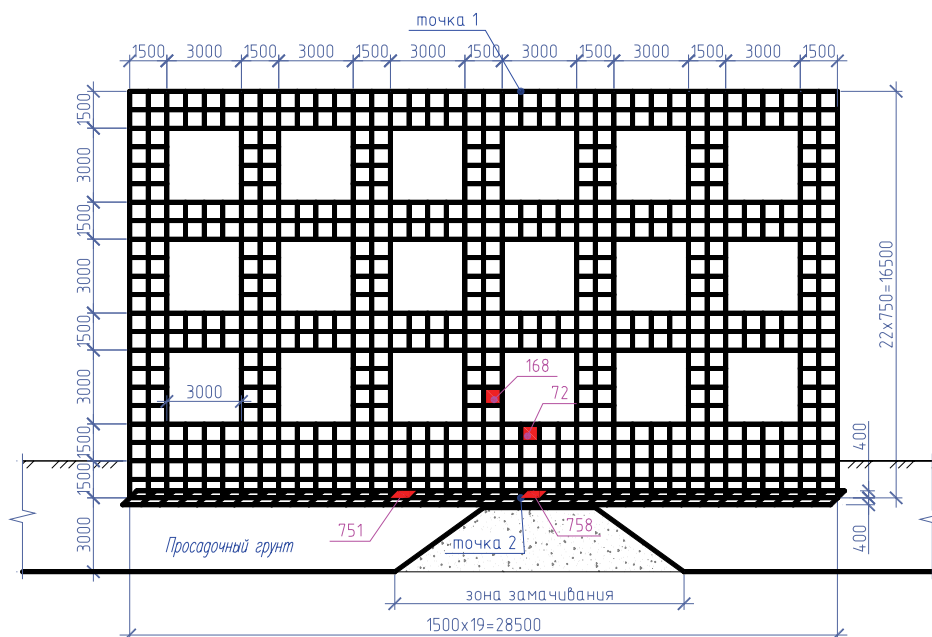
Деформационные характеристики закрепленного грунта определялись в соответствии со стандартной методикой [11].

Частичное закрепление просадочного основания по высоте моделировалось изменением процентного отношения просадочного и закрепленного слоя в пределах толщи просадочного грунта (от подошвы фундамента до конца просадочной толщи) (рис. 4).



**Рисунок 4** – Расчетная схема для определения просадки под элементом фундамента № 3: а) без закрепления основания; б) с частичным закреплением на 75 % от просадочной толщи.

Для детального анализа НДС конструкций зданий были выбраны расчетные сечения для оценки полей напряжений и точки для оценки деформаций (рис. 5).



**Рисунок 5** – Фрагмент крайней стены с расчетными сечениями для анализа НДС при просадке посередине (схема 2а).

Для анализа НДС конструкций были выбраны сечения по фундаментам крайней стены посередине зоны замачивания (конечный элемент 758), а также по предполагаемо наиболее нагруженному участку стены в простенке (конечный элемент 168) и под максимальной просадкой под окном (конечный элемент 72). Для оценки перемещений были выбраны точки 1 и 2 как наиболее подверженные перемещениям под участком максимальной просадки на верху стены и по фундаменту соответственно.

Решая экспоненциальные уравнения для условия  $S + S_{sl} < S_u = 12$  см как достаточное, получаем следующие данные (табл.).

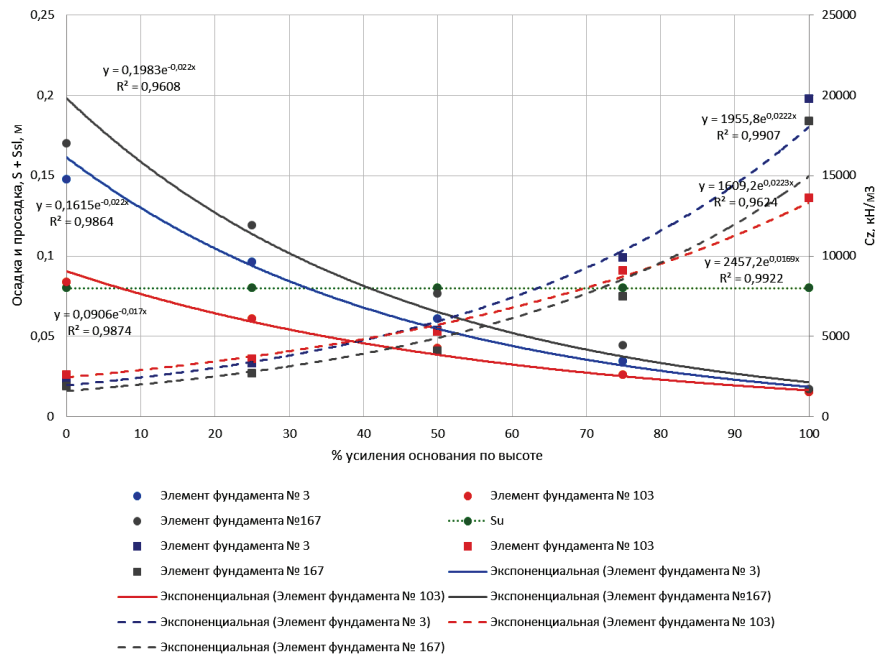
**Таблица** – Зависимость коэффициента жесткости от процента закрепления основания

№ элемента фундамента	Необходимый процент закрепления основания, %	Достаточный коэффициент жесткости, кН/м <sup>3</sup>
3	31,94	3 948
103	7,32	2 782
167	41,26	3 988

По полученным данным были построены зависимости осадок просадок ( $S + S_{sp}$ , м) и коэффициента жесткости основания ( $C_z$ , кН/м<sup>3</sup>) от частичного закрепления основания (рис. 6). Графики имеют экспоненциальную зависимость просадки от процента усиления основания. При этом значительные уменьшения просадок наблюдается при закреплении до 50 % основания, при дальнейшем закреплении уменьшение просадок незначительно.

Изменение коэффициентов жесткости основания при частичном закреплении происходит по экспоненциальной зависимости. При этом для крайних элементов фундаментов (3 и 167) имеют практически одинаковый степенной показатель 0,0222 и 0,0223. Для среднего фундамента экспоненциальная кривая более пологая ввиду меньшего давления под подошвой фундамента. При этом до усиления 50 % наблюдаем незначительное увеличение коэффициента жесткости – на 17 % и при усилении от 75 до 100 % наблюдается увеличение на 50 %.

Таким образом, для фундаментов среднего ряда требуемый коэффициент жесткости основания для выполнения условий просадки можно записать как:



**Рисунок 6** – Изменение коэффициента жесткости основания  $C_z$  и изменения осадки и просадки для расчетных фундаментов при различных значениях закрепления основания.

$$C_{z,sr} = 2457,2 \cdot e^{-0,017 \frac{\ln \frac{Su}{0,0906}}{0,017}} \quad (3)$$

Упростив выражение, получим:

$$C_{z,sr} = \frac{222,62}{Su}, \text{ кН/м}^3, \quad (4)$$

где  $Su$  – предельное значение осадки и просадки здания для сооружения, см.

Для крайнего ряда по элементу фундамента №3:

$$C_{z,sr} = 1955,8 \cdot e^{-0,022 \frac{\ln \frac{Su}{0,1615}}{0,022}} \quad (5)$$

$$C_{z,sr} = \frac{315,86}{Su}, \text{ кН/м}^3. \quad (6)$$

Для крайнего ряда по элементу фундамента №167:

$$C_{z,kr2} = 1609,2 \cdot e^{-0,022 \frac{\ln \frac{Su}{0,1983}}{0,022}} \quad (7)$$

$$C_{z,kr2} = \frac{319,10}{Su}, \text{ кН/м}^3. \quad (8)$$

## ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование свойств и получены характеристики частично закрепленного основания, по которым была смоделирована работа существующего трехэтажного здания школы и определены НДС его конструкций при частичном закреплении основания.

2. При усилении основания существующего здания оценка необходимого процента закрепления основания производится исходя из фактических значений усилий либо деформаций, которые конструкция способна воспринять. Зная допустимые значения усилий или деформаций в конструкциях здания по принятым формулам или графически, можно определить требуемый процент закрепления просадочного грунта.

3. При проектировании нового здания процент частичного закрепления следует определять исходя из технико-экономического обоснования по расходу материалов на конструкции и на усиление основания.

4. Выполнение прерывистого закрепления позволит обойтись без технологических прерывов, существенно уменьшить количество точек инъектирования и расход материалов.

5. Предложенная методика расчета НДС конструкции на частичнозакрепленном просадочном основании позволяет определить % частичного закрепления грунта и схему закрепления, позволяющие снизить дополнительные усилия (напряжения) от просадочных деформаций в конструкциях до допустимых значений, при которых не происходит нарушение их эксплуатационной пригодности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prognosis of foundations under the load increasing in time and cyclic [Текст] / V. B. Shvets, V. G. Shapoval, S. P. Candzuba, S. O. Popovichenko // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – 2007. – № 15. – P. 479–488.
2. Massarsch, K. R. Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests [Текст] / K. R. Massarsch // Geotechnical and Geophysical Site Characterization : Proceedings of the Second International Conference on Site Characterization, ISC-2, Porto, Portugal, September 19–22, 2004. Volume 1. Keynote lectures / Editors: A. Viana Da Fonseca, P. W. Mayne. – Rotterdam : Millpress, 2004. – P. 133–146.
3. СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 2.01.09-91. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 73 с.
4. ДБН В.1.1-5-2000. Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих грунтах. Частина 1. Будинки і споруди на підроблюваних територіях [Текст]. – На заміну СНиП 2.01.09-91, РСН 227-88, РСН 232-88, РСН 297-78, РСН 340-86, РСН 349-88 ; введені в дію з 1 липня 2000 р. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2000. – 67 с.
5. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* [Текст]. – Введ. 2011-05-20. – М. : Минрегион России, 2011. – 161 с.
6. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування [Текст]. – Введено вперше зі скасуванням на території України СНиП 2.02.01-83 ; чинні від 2009-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 107 с.
7. Програмный комплекс ЛИРА-САПР. 2013 [Текст] : Учебное пособие / Д. А. Городецкий, М. С. Барабаш, Р. Ю. Водопьянов, В. П. Титок, А. Е. Артамонова ; Под редакцией академика РААСН А. С. Городецкого. – К. ; М. : Электронное издание, 2013. – 376 с.
8. Клепиков, С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании [Текст] / С. Н. Клепиков. – К. : НИИСК, 1996. – 204 с.
9. Трегуб, А. С. Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах [Текст] / А. С. Трегуб, С. Н. Клепиков. – К. : Будівельник, 1987. – 200 с.
10. Крутов, В. И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах [Текст] / В. И. Крутов. – К. : Будівельник, 1982. – 224 с.
11. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності та деформованості [Текст]. – На заміну ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85 ; чинний з 1997-04-01. – К. : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 102 с.

Получено 29.04.2017

#### А. В. ПИСАРЕНКО, В. В. ЯРКІН ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ, ЩО ВЗАЄМОДІЄ З ПРОСАДНОЮ ОСНОВОЮ ПРИ ЇЇ ЧАСТКОВОМУ ЗАКРІПЛЕННІ ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті досліджено вплив часткового закріплення просадного ґрунту на коефіцієнт жорсткості основи і напружено-деформований стан (НДС) конструкцій, що взаємодіють з деформувальною основою. Представлено результати визначення ПДВ фрагмента безкаркасної будівлі при різних схемах зміни жорсткості основи в плані і виконано їх аналіз з визначенням оптимальної схеми, які забезпечує допустимий рівень додаткових зусиль, що виникають в будівельних конструкціях при реалізації залишкових просадних властивостей ґрунту.

**Ключові слова:** просадні ґрунти, коефіцієнт жорсткості основи, взаємодія з деформувальною основою.

ANASTASIA PISARENKO, VIKTOR IARKIN  
NUMERICAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF BUILDING  
STRUCTURES INTERACTING WITH A SUBSIDENCE BASE WITH ITS  
PARTIAL FIXATION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The influence of partial consolidation of subsidence ground on the coefficient of rigidity of the base and the stress-strain state (VAT) of structures interacting with the deformable base has been investigated in the article. The results of determining the VAT of the frameless building fragment under different schemes of base rigidity change in the plan have been presented and their analysis has been performed with the determination of the optimal scheme ensuring the permissible level of additional forces arising in the construction structures when residual subsidence properties have been realized.

**Key words:** subsidence grounds, coefficient of rigidity of the base, interaction with deformable base.

**Писаренко Анастасия Валериевна** – ассистент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование напряженно-деформируемого состояния зданий и сооружений на просадочных грунтах.

**Яркин Виктор Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры оснований, фундаментов и подземных сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: взаимодействие зданий и сооружений с неравномерно деформируемым основанием. Строительство и проектирование зданий и сооружений в сложных инженерно- и горно-геологических условиях.

**Писаренко Анастасія Валеріївна** – асистент кафедри техносферної безпеки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану будівель і споруд на просадних грунтах.

**Яркін Віктор Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри основ, фундаментів і підземних споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: взаємодія будівель і споруд з нерівномірно деформувальною основою. Будівництво та проектування будівель і споруд в складних інженерно- і гірничо-геологічних умовах.

**Pisarenko Anastasia** – assistant, Safety Technospheric Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of the stress-strain state of buildings and structures on subsidence grounds.

**Iarkin Viktor** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Foundations, Foundations and Underground Structures Department, Donbas National Academy of Construction and Architecture. Scientific interests: interaction of buildings and structures with an unevenly deformable base. Construction and design of buildings and structures in complex engineering and geological conditions.