

## ВЛИЯНИЕ ОПРЕССОВКИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НДС ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, ОБЪЕДИНЕННЫХ ПЛИТАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Степанов М.А.

*ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия (625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2), e-mail: maxim\_stepanov@inbox.ru*

Наличие слабых подстилающих грунтов на территории Тюменской области вызывает ряд трудностей проектного и производственного характера при строительстве высотных и повышенной этажности зданий. Для обеспечения требования не превышения предельно допустимых осадок разработан ленточный свайный фундамент, объединенный плитами переменной жесткости, с предварительным напряжением грунтового основания, достигаемым за счет нагнетания под давлением растворной смеси. В статье представлен анализ влияния предварительного напряжения грунта за счет опрессовки пролетного пространства фундамента цементным раствором, применительно к реальным сооружениям, с помощью программного комплекса Plaxis 3D в условиях объемной деформации с использованием модели Hardening Soil. Варьирование очередности опрессовываемых пролетов позволяет добиваться требуемых параметров грунтового основания в плане и по глубине, улучшающих взаимодействие с фундаментом и надземной частью здания или сооружения.

Ключевые слова: грунтовое основание, ленточный фундамент, свая, плита переменной жесткости, предварительное напряжение, численное моделирование, технология, напряженно-деформированное состояние.

## SOIL PRE-STRESS INFLUENCE ON THE GROUND BASE STRAIN-STRESS BEHAVIOUR OF STRIP PILE FOUNDATIONS COMBINED BY VARIABLE RIGIDITY PLATE

Stepanov M.A.

*Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia (625001, Tyumen, street Lunacharskogo, 2), e-mail: maxim\_stepanov @inbox.ru*

Soft underlying soils of Tyumen region territory produce some difficulties for design and construction work of high-rise building. A strip pile foundation combined by plate of variable rigidity with pre-stressed ground base was made for the non-exceedance enforcement of maximum allowable settlement. Pre-stressing was created by mortar injection under the plate. The article presents the analysis of soil pre-stress influence in respect to real conditions by Plaxis 3D computational modelling in Hardening Soil model. Priority variation of pre-stressing building bay soil achieves design objectives of ground base in plan and in depth. It rationalizes interaction between ground base and foundation.

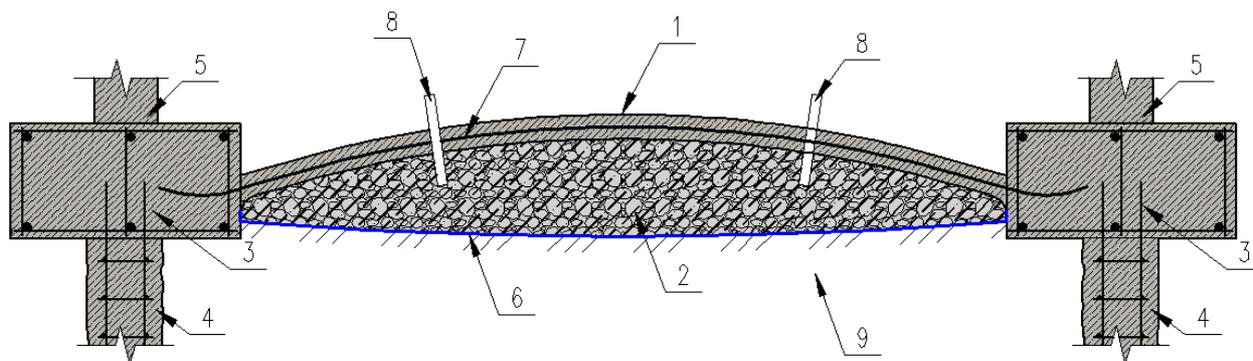
Keywords: ground base, strip foundation, pile, plate of variable rigidity, pre-stress, computational modeling, technology, stress-strain behavior.

Наличие слабых подстилающих грунтов на территории Тюменской области вызывает ряд трудностей проектного и производственного характера при строительстве различных объектов. Инженерно-геологические условия на данной территории представлены аллювиальными грунтами с относительно невысокими прочностными и деформационными характеристиками [5]. Верхние слои зачастую сложены прочными глинами, суглинками и супесями с модулем деформации от 7–15 МПа мощностью 2–3 м; далее идут слабые слои глин от мягкопластичной до текучей консистенции; на глубине 15–20 м залегают прочные слои песка или глин. Большинство грунтов имеют низкую несущую способность и высокую деформативность при восприятии внешних нагрузок. По строительной классификации они

относятся к слабым, зачастую одновременно по трем основным показателям: по модулю деформации  $E$ , по расчетному сопротивлению  $R$  и по степени влажности  $S_r$ .

В данных условиях при воздействии на грунтовое основание давления от 200 до 450 кПа актуальным является вопрос обеспечения требований не превышения допустимых осадок. Использование плитных фундаментов невозможно по причине сверхнормативных расчетных осадок, свайные фундаменты в виде забивных свай длиной до 12м неприменимы по причине малой несущей способности, а использование составных забивных свай и буровых технологий связано с повышенной материалоемкостью и большими затратами [2].

Для обеспечения требования не превышения предельно допустимых осадок предлагается использование разработанного ленточного свайного фундамента, объединенного плитами переменной жесткости (КЛСФ), с предварительным напряжением грунтового основания (рис. 1) [4].



**Рис. 1.** Фрагмент КЛСФ с предварительным напряжением грунтового основания: 1 – пологая армированная оболочка; 2 – криволинейное искусственное основание с нагнетенным раствором (после твердения раствора – плита переменной жёсткости); 3 – ленточный ростверк; 4 – свая; 5 – несущие стены; 6 – пленка; 7 – армирующая сетка оболочки; 8 – перфорированный иньектор; 9 – предварительно напряженное естественное основание

КЛСФ состоит из плит переменной жесткости, ограниченных перекрестно расположенными ростверками, объединяющими несущие сваи. Фундамент является технологически трансформируемой системой, в которой напрягаемая раствором армированная оболочка положительной или нулевой Гауссовой кривизны, устроенной по криволинейной поверхности искусственного основания из щебня или другого минерального материала, после твердения нагнетаемого раствора преобразуется в плиту переменной жесткости.

Данный вид фундаментов существенно отличается от известных комбинированных фундаментов, которые в настоящее время широко применяются во всем мире, и исследованию которых посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [1,

6, 7]. Основные отличия предлагаемых фундаментов от комбинированных свайно-плитных фундаментов (КСПФ) заключаются в следующем:

- Сваи устраняют дефицит жесткости основания и расположены не под всей площадью здания с определенным шагом в двух направлениях, а четко под силовыми линиями нагружения (несущими стенами, колоннами).
- Плита переменной жесткости обладает меньшей материалоемкостью, а расположение всей рабочей арматуры по линии главных растягивающих напряжений позволяет эффективно воспринимать изгибающие моменты и поперечные силы после приложения на фундамент внешних (эксплуатационных) нагрузок.
- Включение в работу каждого элемента фундамента уже на начальном этапе строительства здания или сооружения.
- Напряжение грунтового основания опрессовкой позволяет существенно улучшить строительные свойства грунтов в пролетной части, уменьшить их сжимаемость в активном слое.
- Напряжение грунтового основания опрессовкой позволяет создать дополнительное обжатие боковым давлением верхней части свай, что приводит к увеличению их несущей способности.
- При первом и (возможно) последующих циклах нагружения и разгрузки опрессовкой в грунте накапливаются остаточные деформации и остаточные напряжения (боковое давление), влияющие на НДС грунтового основания непосредственно при статическом нагружении фундамента. При действии начальных ступеней эксплуатационной нагрузки грунт в активном слое работает в соответствии с модулем вторичного нагружения  $E_e$ .
- Восстановление за счет выполнения опрессовки контактного слоя «фундамент – грунтовое основание», устранение последствий расструктурирования, возникающего по причине метеорологических воздействий на грунтовое основание, воздействия грунтовых вод и в том числе гидродинамического давления, динамического воздействия механизмов и ошибок строителей в процессе производства земляных работ.
- Устранение деформаций промораживания и последующего оттаивания грунтового основания при возведении фундаментов зданий или сооружений в холодный период года, продолжительность которого, например, на территории юга Тюменской области составляет от 163 суток в год [3].
- Создание противofильтрационной мембраны за счет использования в качестве инъекции гидротехнического раствора с повышенным сопротивлением фильтрации воды.

Опрессовка грунтового основания оказывает значительное влияние на формирование НДС основания. Варьирование таких параметров, как: давление опрессовки, очередность

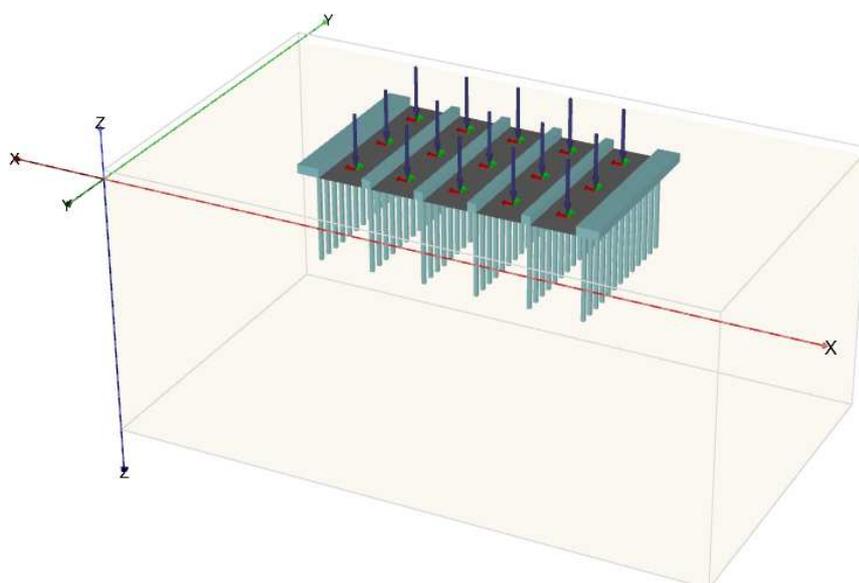
опрессовываемых пролетов, стадийность выполнения в процессе строительства или эксплуатации объекта – позволяют добиваться требуемых параметров грунтового основания в плане и по глубине, улучшающих взаимодействие с фундаментом и надземной частью здания или сооружения.

Для того чтобы проанализировать влияние распространения преднапряжения грунтового основания применительно к реальным сооружениям, с помощью программного комплекса Plaxis 3D в условиях объемной деформации с использованием модели Hardening Soil (модель упрочняющегося грунта) была рассмотрена задача моделирования многопролетного КЛСФ (рис. 2). Параметры модели указаны в таблице 1.

**Таблица 1**

Параметры модели Hardening Soil

Символ	Название	Значение	Ед. изм.
$E_{50}^{ref}$	Секущий модуль упругости при 50 % значений девиатора, полученный из трехосных испытаний	3875	кН/м <sup>2</sup>
$E_{oed}^{ref}$	Касательный модуль упругости из компрессионных испытаний	3100	кН/м <sup>2</sup>
$E_{ur}^{ref}$	Модуль упругости при разгрузке-повторном нагружении из компрессионных испытаний	23250	кН/м <sup>2</sup>
$\nu_{ur}$	Коэффициент Пуассона при разгрузке – повторном нагружении, по умолчанию $\nu_{ur} = 0,2$	0,2	-
$m(power)$	Показатель степени, для описывания влияния ограничивающего давления на модуль упругости, определяется из компрессионных испытаний.	0,9	-
$K_0$	Коэффициент бокового давления грунта $K_0 = \sigma'_{xx} / \sigma'_{yy}$ при консолидации, $K_0^{NC} = 1 - \sin \varphi$	0,724	-
$p^{ref}$	Опорный уровень напряжений, по умолчанию $p^{ref} = 100$	100	кН/м <sup>2</sup>
$c$	Эффективное сцепление из трехосных испытаний	41	кН/м <sup>2</sup>
$\varphi (phi)$	Эффективный угол внутреннего трения из трехосных испытаний	16	град
$\psi (psi)$	Эффективный угол дилатансии из трехосных испытаний, обычно $\psi = \varphi - 30^\circ$	-	град



**Рис. 2.** Расчетная схема создания предварительного напряжения грунтового массива многопролётного КЛСФ

Расчетная схема представлена пятью опрессовываемыми пролетами грунтового основания между ленточными свайными фундаментами. На схеме присутствуют крайние пролеты (далее пролет № 1 и пролет № 5), средние пролеты (далее пролет № 2 и пролет № 4) и центральный пролет (далее пролет № 3).

Фундамент представляет собой шесть ленточных свайных фундаментов, расстояние в осях между которыми составляет 6 м. Сваи выполнены квадратного сечения 300x300мм длиной  $l=12$ м, расстояние между сваями в ленте 1м. По всей ширине пролетной части приложена равномерно распределенная по площади нагрузка интенсивностью 100 кПа, представляющая процесс опрессовки грунтового основания.

Необходимо отметить, что при опрессовке каждого последующего пролета равномерно распределённая нагрузка, приложенная на грунтовое основание в предыдущем пролете, снималась.

Рассмотрено четыре различные последовательности (П) создания предварительного напряжения грунтового основания:

*П1* – Предварительное напряжение грунтового основания выполняется от краев к центру, что позволяет дополнительно обжать центральный пролет. Данная последовательность затрудняет распространение деформаций грунтового основания за пределы фундамента, напряжения концентрируются в грунтовом основании между центральными ленточными свайными фундаментами (в наиболее нагруженной в процессе строительства здания или сооружения области грунтового основания).

*Последовательность: №1+№5 → №2+№4 → №3* (рис. 3а; рис. 4а).

П2 – Предварительное напряжение грунтового основания выполняется от центра к краям фундамента. Данная последовательность дает возможность отжать воду из грунта за пределы пятна застройки в случае водонасыщенных грунтовых оснований.

Последовательность: №3 → №2+№4 → №1+№5 (рис. 3б; рис. 4б).

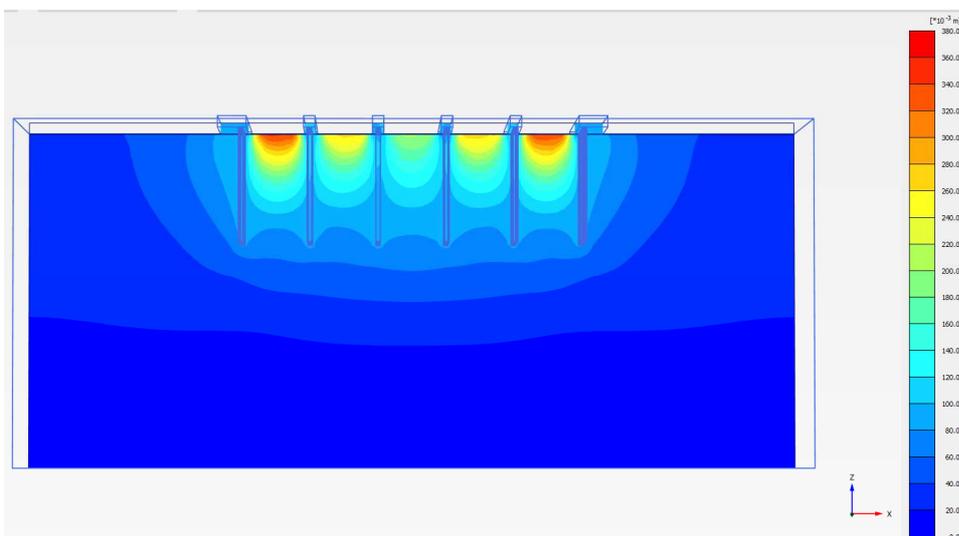
П3 – Предварительное напряжение грунтового основания выполняется от средних пролетов. Данная последовательность позволяет более равномерно распределить напряжения, возникающие в грунте в процессе опрессовки, что может быть полезно в случае равномерно распределенной на фундамент нагрузки от здания или сооружения.

Последовательность: №2+№4 → №3 → №1+№5 (рис. 3в; рис. 4в).

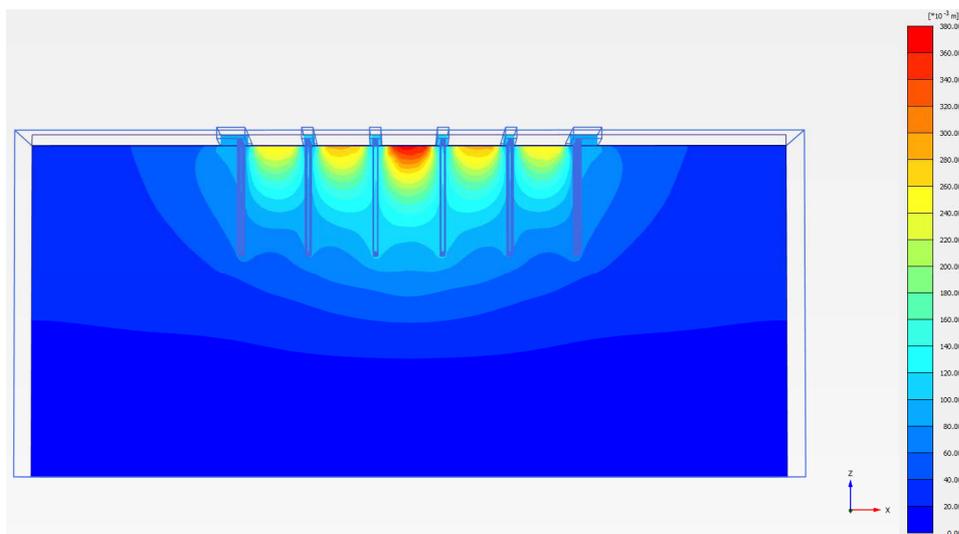
П4 – Предварительное напряжение грунтового основания выполняется по принципу устройства бурокасательных свай, когда опрессовка в продольном направлении выполняется через один пролет с движением от центра к краям или наоборот.

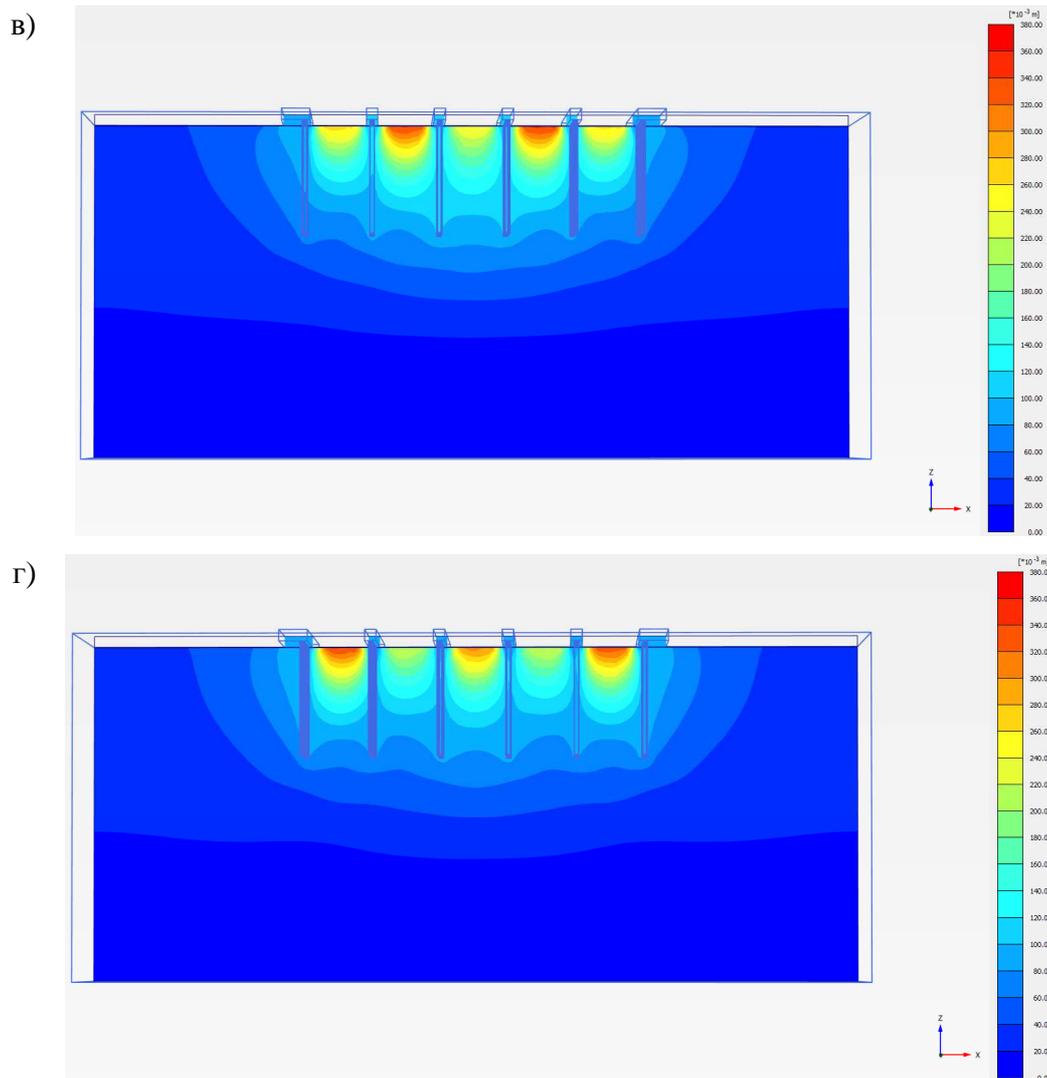
Последовательность: №1+№5 → №3 → №2+№4 (рис. 3г; рис. 4г).

а)



б)





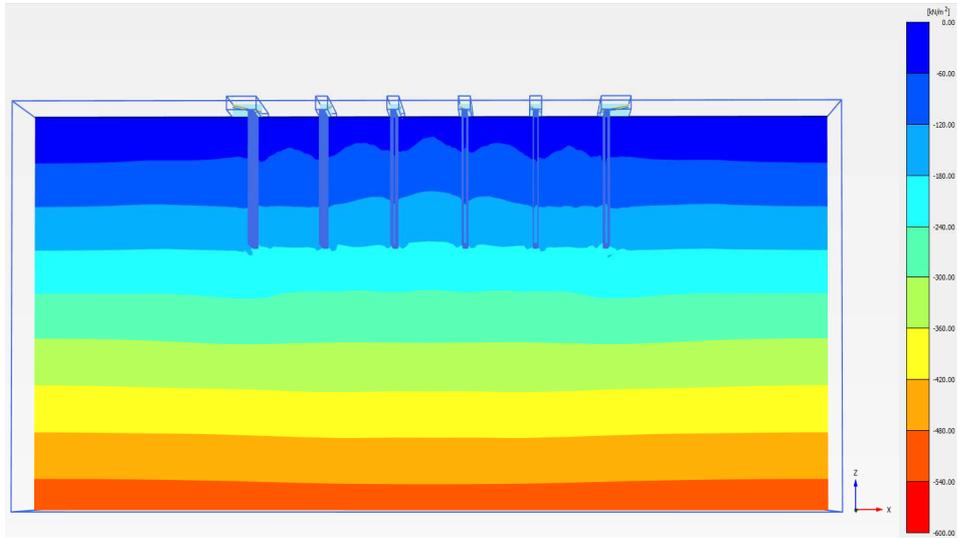
**Рис. 3.** Общие перемещения предварительно напряженного грунтового основания при различных технологических последовательностях опрессовки:

- а) П1 - №1+№5 → №2+№4 → №3, б) П2 - №3 → №2+№4 → №1+№5,  
 в) П3 - №2+№4 → №3 → №1+№5, г) П4 - №1+№5 → №3 → №2+№4.

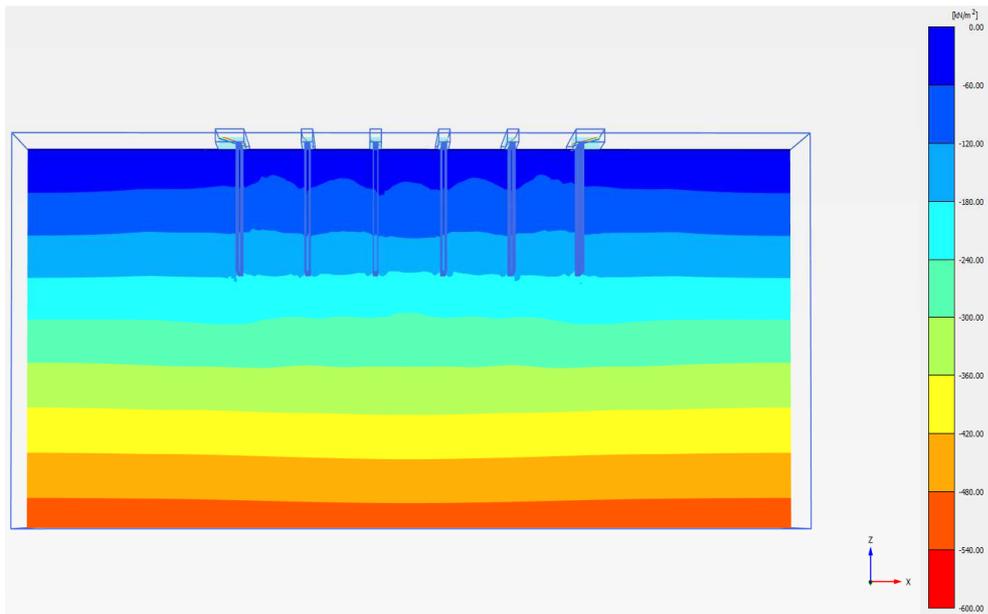
Максимальные деформации предварительно напряженного грунтового основания при различных технологических последовательностях в каждом случае зафиксированы в пролетах, с которых начинался процесс опрессовки (рис. 3). В случае выполнения опрессовки от центра к краям (П2) основные деформации концентрируются под центральным пролетом и развиваются в основном по глубине, достигая величины  $2B$  (рис. 3б), наиболее же равномерное перемещение грунтового основания под всей площадью исследуемого КЛСФ зафиксировано в случаях П1 (рис. 3а) и П4 (рис. 3г). При опрессовке от краев к центру (П1) деформации грунтового основания развиваются в основном по ширине фундамента, основные деформации по глубине зафиксированы на расстоянии от 1 до  $1,5B$  (рис. 3а). Полное затухание деформаций грунтового основания в каждом из случаев

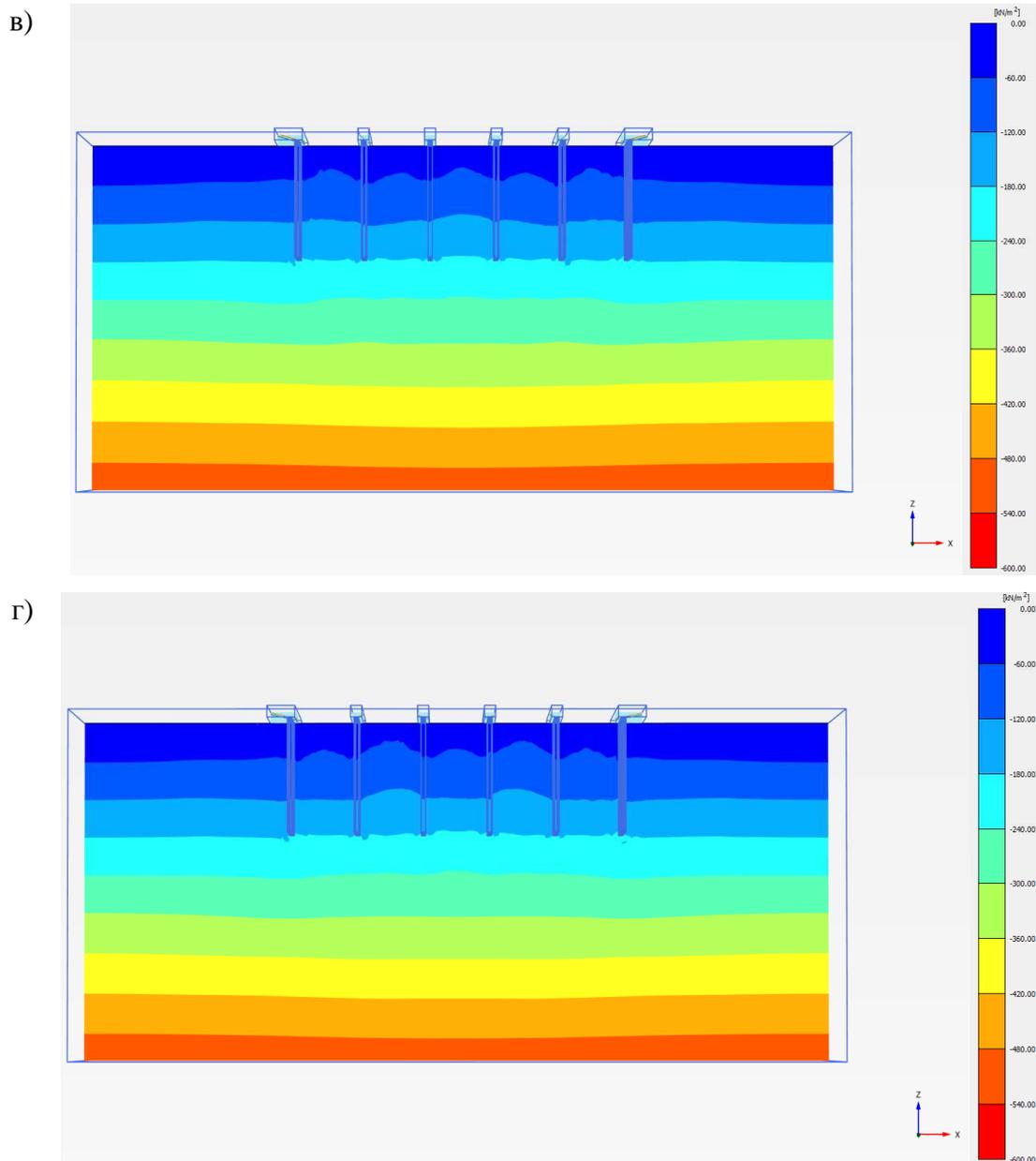
технологической последовательности опрессовки зафиксировано на глубине до  $4B$ , где  $B$  – это ширина пролета КЛСФ.

а)



б)





**Рис. 4.** Общие напряжения грунтового основания при различных технологических последовательностях опрессовки:

- а) П1 - №1+№5 → №2+№4 → №3, б) П2 - №3 → №2+№4 → №1+№5,  
 в) П3 - №2+№4 → №3 → №1+№5, г) П4 - №1+№5 → №3 → №2+№4.

Максимальные напряжения грунтового основания при различных технологических последовательностях в каждом случае зафиксированы в пролетах, на которых заканчивался процесс опрессовки (рис. 4). Так, в случае опрессовки по П1 (рис. 4а) от краев к центру наибольший рост напряжений отмечен в грунтовом массиве под центральным пролетом КЛСФ. При опрессовке по П2 (рис. 4б) от центра к краям и по П3 (рис. 4в) общие напряжения увеличиваются практически равномерно. Наибольшее увеличение общих напряжений происходит в случае опрессовки по П4, рост напряжений составляет до 200 % и распространяется на глубину до 1,5В (рис. 4г).

Таким образом, наиболее эффективной является последовательность выполнения опрессовки через один пролет с движением от краев к центру (последовательность *П4*), позволяющая оказать максимальное влияние на напряженно-деформированное состояние грунтового основания фундамента.

### Список литературы

1. Готман Н.З. Расчет свайно-плитных фундаментов из забивных свай с учетом образования карстового провала: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 348 с.
2. Ким Б. Г., Пронозин Я.А., Волосюк Д.В. Устройство ленточных фундаментов мелкого заложения, объединенных пологими оболочками // Механизация строительства. – 2014. – № 9. – С. 9-14.
3. СП131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*.
4. Тер-Мартirosян З.Г., Пронозин Я.А., Степанов М.А. Обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов с предварительно напряженным грунтовым основанием // Основания, фундаменты, механика грунтов. – 2012. – № 4. – С. 2–5.
5. Тетиор, А.Н. Прогрессивные конструкции фундаментов для условий Урала и Тюменской области / А.Н. Тетиор. – Свердловск: Средне Уральское изд-во, 1971. – 91с.
6. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengründung / In Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis «Pfähle» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). Ernst & Sohn, 2002.
7. Poulos H.G. Piled-raft foundations – design and applications // Geotechnique. 2001. V. 50. № 2. P. 95-113.

### Рецензенты:

Миронов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ, г. Тюмень;

Соколов В.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Строительной механики ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ, г. Тюмень.