

ШОКАРЕВ ВИКТОР СЕМЕНОВИЧ

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор Запорожского отделения Государственного предприятия "Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций", член Международного общества по механике грунтов и геотехническому строительству.

Основные направления научной деятельности: строительство, реконструкция и эксплуатация зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, техническое диагностирование строительных конструкций, разработка геотехнологий и автоматизированных систем мониторинга строительных объектов.

Автор более 150 научных работ.

E-mail: zoniisk@mail.ru

ШАПОВАЛ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры оснований и фундаментов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры, член Украинского, Российского и Международного обществ по механике грунтов, фундаментостроению и геотехнике.

Основные направления научной деятельности: реология и нелинейная механика грунтов.

Автор более 100 научных трудов.

E-mail: niisk@mail.ru

САМЧЕНКО РОМАН ВАСИЛЬЕВИЧ

Заведующий сектором Запорожского отделения Государственного предприятия "Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций", член Всеукраинской общественной организации «Украинское общество механики грунтов, геотехники и фундаментостроения».

Основные направления научно-технической деятельности: разработка и исследования геотехнологий, выравнивание зданий и сооружений.

Автор 14 научных работ.

E-mail: zoniisk@mail.ru

ЧАПЛЫГИН ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ

Кандидат технических наук.

Основные направления научной деятельности: разработка геотехнологий и автоматизированных систем мониторинга строительных объектов.

Автор более 70 научных работ.

ВОЛКОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

Заведующий группы Запорожского отделения Государственного предприятия "Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций", член Всеукраинской общественной организации «Украинское общество механики грунтов, геотехники и фундаментостроения».

Основные направления научной деятельности: численное моделирование оснований и фундаментов

Автор более 10 научных трудов

E-mail: zoniisk@mail.ru

УДК 624.1

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-ЛЕНТОЧНЫЙ ФУНДАМЕНТ» ПРИ УСТРАНЕНИИ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ КРЕНОВ ЗДАНИЙ

Ключевые слова: ленточный фундамент, крен, подработка, грунтовое основание, модель, контроль параметров

Выполнена классификация технологий устранения кренов зданий и сооружений. Предложена геомеханическая и расчетная модели грунтового основания, соответствующие физическому состоянию грунта под подошвой ленточного фундамента, подрабатываемого горизонтальными цилиндрическими скважинами. Приведена структурная схема устройства для контроля параметров системы «подрабатываемое грунтовое основание - ленточный фундамент с креном».

Виконана класифікація технологій усунення кренів будинків і споруд. Запропонована геомеханічна й розрахункова моделі ґрунтової основи, відповідні до фізичного стану ґрунту під подошвою стрічкового фундаменту, підроблювального горизонтальними циліндричними свердловинами. Наведена структурна схема пристрою для контролю параметрів системи «підроблюємої ґрунтова основи - стрічковий фундамент із креном».

The classification of technologies of tilts elimination of buildings and constructions is carried out. It is offered the geomechanical and design models corresponding to physical state of soil under strip foundation underworked by horizontal cylindrical boreholes. The structural diagram of the device for control of parameters of the system "foundation soil - strip foundation with tilt" is presented

1. ВВЕДЕНИЕ

Крен фундамента является одним из критериев, определяющих эксплуатационную пригодность строительного объекта. Нормативными документами ограничиваются допустимые величины кренов зданий и сооружений. Однако во многих случаях крен фундамента, на разных этапах жизненного цикла строительного объекта, превышает допустимые величины, а иногда предельные [1]. Для дальнейшей безопасной эксплуатации такого здания необходимо выбрать и реализовать оптимальную технологию устранения сверхнормативного крена. При проведении данного вида работ необходимо обеспечить адекватный прогноз геомеханических процессов в системе «основание – фундамент – верхнее строение».

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УСТРАНЕНИЯ КРЕНОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Устранение кренов зданий и сооружений производится путем инженерного воздействия на их подсистемы «фундамент - верхнее строение» или «основание - фундамент» [2].

Воздействие на подсистему «фундамент - верхнее строение» обычно производится путем подъема верхнего строения поршневыми или плоскими металлическими, резиновыми домкратами. Домкраты устанавливаются в специальные ниши в фундаментно-подвальной части здания и объединяются в одномагистральные или модульные системы. Возможно также опускание верхнего строения за счет активных конструктивных систем, размещенных при строительстве в цокольных несущих элементах здания. Конструктивные системы включают в себя термопластические элементы (асфальтобетон, полимеры и т.д.) или регулирующие устройства, в которых в качестве удаляемой рабочей среды наиболее часто используется песок или вода.

Воздействие на подсистему «основание - фундамент» осуществляется путем изменения геомеханических параметров грунтов оснований или их подработкой. Для изменения физико-механических характеристик грунтов, с целью реализации осадки фундаментов менее просевшей части здания, используются следующие технологии: регулируемое замачивание (пропаривание) грунта; пригрузка основания дополнительной статической нагрузкой; пригрузка (разгрузка) основания натяжными устройствами; электроосмос.

Подработка грунта в основании фундаментов может осуществляться вертикально, наклонно или горизонтально относительно подошвы фундамента. При этом используются следующие виды бурения: механическое, механическое с обсадкой, ударное, гидромеханическое, роторное, а также подрезка грунтового основания бесконечной цепью.

Для подъема фундаментов просевшей части здания может применяться высоконапорная инъекция в грунтовое основание строительного объекта.

На основании вышесказанного можно предложить следующую классификацию технологий устранения кренов системы «основание - фундамент - верхнее строение»:

1. устройство адаптационных систем (домкратные, конструктивные);
2. изменение геомеханических свойств грунтового основания (замачиванием, пропариванием, пригрузкой, электроосмосом, инъекцией);
3. подработка грунтового основания (горизонтальная, вертикальная, наклонная).

В настоящее время наиболее широкое применение находит технология устранения кренов зданий, возведенных на

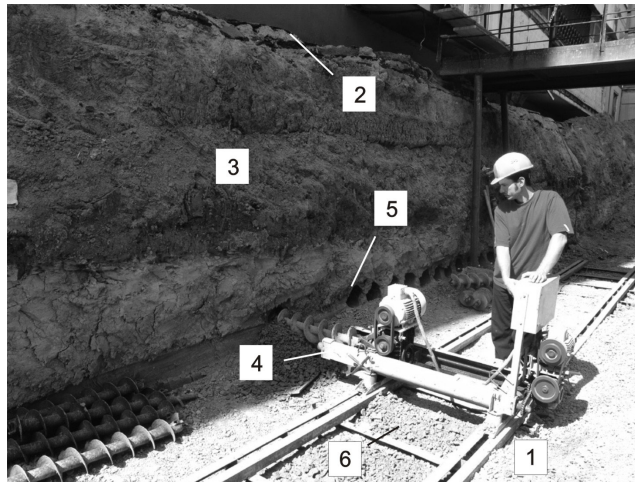


Рис. 1 Подработка грунта в основании здания механическим бурением горизонтальных цилиндрических скважин: 1 – котлован; 2 – фундамент здания; 3 – откос котлована; 4 – буровой станок; 5 – горизонтальная цилиндрическая скважина; 6 – выбуренный грунт.

ленточных фундаментах, основанная на локальной горизонтальной подработке грунтового основания цилиндрическими скважинами.

Работы по локальной горизонтальной подработке грунтового основания обычно производятся в следующей технологической последовательности (рис.1):

- устройство котлована со стороны менее просевшей части здания или сооружения;
- выбуривание необходимого количества грунта из основания строительного объекта путем устройства горизонтальных цилиндрических скважин, выполненных по расчетным параметрам (шаг, диаметр скважин, длина);
- локальное увлажнение грунта вокруг контура цилиндрических скважин;
- регулирование технологических осадок фундаментов путем локального разрыхления (закрепление) грунта вокруг скважин и восстановление вертикального положения строительного объекта;
- выполнение обратной засыпки котлована.

3. ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ПОДРАБАТЫВАЕМОЕ ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ – ЛЕНТОЧНЫЙ ФУНДАМЕНТ С КРЕНОМ»

Главной проблемой при разработке проектных решений для устранения кренов зданий, путем локальной горизонтальной подработки грунтового основания, является обеспечение геотехнической безопасности строительного объекта. Прогнозирование технологических осадок и крена здания выполняется с использованием современных методов теоретической и прикладной геомеханики, а также с учетом особенностей устройства котлована, бурения скважин и т.д.

Для повышения надежности прогноза напряженно-деформированного состояния системы «основание – ленточный фундамент с креном» необходимо:

- выполнить в необходимом объеме инженерно - геологические изыскания;
- выбрать расчетную геомеханическую модель грунтового массива, соответствующую физическому состоянию подрабатываемого грунта и конструктивным особенностям фундаментов;

- определить параметры деформируемости слоев грунтового массива и напряжения в грунтовом основании, учитывающие особенности бурения горизонтальных цилиндрических скважин;
- использовать адекватные методы численного моделирования напряженно-деформируемого состояния грунтового основания, позволяющие учитывать характер его структурного состояния, в т.ч. в процессе производства работ.

Для разработки геомеханической и расчетной модели системы «подработанный грунтовый массив(основание) – фундамент с креном» исследовалась общая закономерность деформирования подрабатываемого грунтового основания, и в частности, контура цилиндрических скважин. Для этого были выполнены многочисленные натурные эксперименты в процессе устранения сверхнормативных кренов зданий (табл. 1).

Табл. 1 Опыт устранения кренов зданий с использованием технологии горизонтальной подработки грунтового основания цилиндрическими скважинами.

Вид объекта	Кол-во, шт	Кол-во этажей	Отклонение от вертикали, мм	Устранение крена, %
Панельные здания	30	4-14	200-560	95-106
Кирпичные здания	8	3-14	95-540	92-100

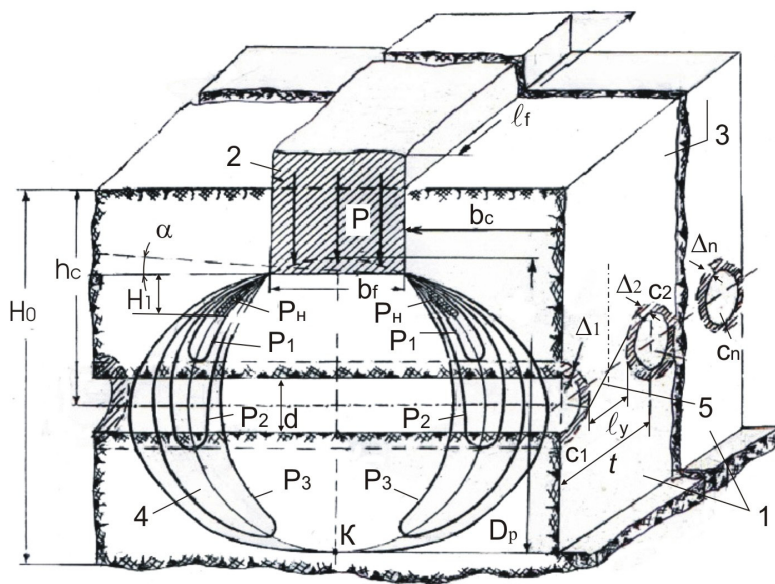


Рис. 2 Геомеханическая модель напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунтового массива под подошвой ленточного фундамента с креном: 1 – грунтовое основание; 2 – ленточный фундамент; 3 – откос котлована; b_f, l_f, α – ширина, длина, угол наклона фундамента; P – начальная распределенная нагрузка; b_c – толщина грунтовой стенки; C_1, C_2, \dots, C_n – горизонтальные цилиндрические скважины; h_c, d, t – глубина заложения, диаметр и шаг скважин; H_0 – физическая глубина грунтового массива; P_n – область зарождения начальной пластической деформации у грани фундамента; H_1 – высота начальных пластических областей; P_1, P_2, P_3 – пластические области, возникающие по линии окружности 4 диаметром D_p в грунтовом массиве при увеличении нагрузки P ; $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ – ширина кольцевых пластических областей вокруг скважин; 5 – линия разрушения грунта трещиной между рядом расположенными скважинами; l_y – ширина упругого участка (целика) грунта между скважинами; K – точка соединения пластических областей при полном разрушении грунта.

При разработке геомеханической модели грунтового массива и расчетной модели подрабатываемого грунтового основания приняты следующие допущения:

- разрушение грунта под подошвой ленточного фундамента происходит в локальных областях (целиках) между рядом расположенными цилиндрическими скважинами;
- механизм разрушения грунта связан со сдвиговыми деформациями, происходящими, при нагрузках больших предельного сопротивления грунта;
- фракции разрушения грунта в целиках перемещаются в полость скважины.

На основании выполненных исследований предложена геомеханическая модель системы «подрабатываемый грунтовой массив – ленточный фундамент с креном», которая позволяет выделить основные физические процессы формирования напряженно-деформированного состояния в данной системе (рис.2).

Ширина грунтовой стенки между котлованами и фундаментом в направлении его длины зависит в первую очередь от ширины фундамента, через грани подошвы которого проходит окружность развития вершин пластических областей. Параметры грунтовой стенки зависят также от ширины пластических областей, являющихся функцией внешней распределенной нагрузки. Следовательно при отрывке котлована не должен быть нарушен внешний контур пластической области грунта. Глубина котлована назначается в зависимости от величины требуемой технологической осадки и габаритных размеров бурового оборудования.

Одним из основных факторов, влияющим на характер напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунтового массива, является степень взаимодействия начальных пластических областей у граней фундамента с пластическими областями возникшими по контуру пробуренных цилиндрических скважин. Для исключения разрушения грунта, в процессе этого взаимодействия, глубина заложения скважин должна быть больше высоты начальных пластических областей. Непосредственно в процессе устранения крена фундамента характер распределения нагрузки по длине фундамента становится более равномерным, что практически сводит к минимуму возможность взаимодействия между вышеуказанными пластическими областями.

Шаг и диаметр скважин определяется с учетом характера распределения величин технологических осадок по длине фундамента и рассчитывается с учетом ширины кольцевых пластически деформированных областей, сформированных вокруг скважин. При этом в области грунта между рядом расположенными скважинами не должно происходить взаимодействие кольцевых пластических областей.

В значительной степени характер напряженно-деформированного состояния исследуемой системы, при взаимодействии с нагрузкой, зависит от толщины сжимаемого грунтового массива. В процессе устранения крена фундамента непрерывно происходит перераспределение полосовой нагрузки, а следовательно и непрерывное изменение напряженно-деформированного состояния

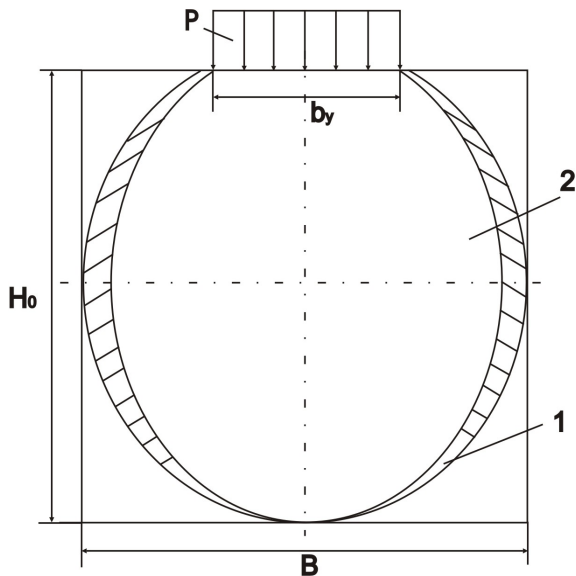


Рис. 3 Расчетная схема системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном»: 1 – контур развития пластических областей; 2 – область грунта в котором бурятся скважины; 3 – горизонтальные цилиндрические скважины; D_p – диаметр окружности развития пластических областей b_f – ширина фундамента; B – ширина грунтового массива в форме прямоугольника; H_0 – физическая толщина сжимаемого слоя грунта; P – распределенная нагрузка.

подрабатываемого грунтового основания. Поэтому при разработке расчетной модели грунтового основания можно использовать принцип в основу которого положено аппроксимация контура грунтового основания в виде прямоугольника (плоская задача) или параллелепипеда (пространственная задача) (Ter-Martirosayn, 2005).

Если в данной расчетной модели учесть физическую толщину сжимаемого слоя, то она приблизится к реальной физической модели системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном». Предлагаемый вариант расчетной модели, исследуемой системы, учитывающий физическую толщину сжимаемого слоя грунта приведен на рис.3.

4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «ПОДРАБАТЫВАЕМОЕ ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ – ЛЕНТОЧНЫЙ ФУНДАМЕНТ С КРЕНОМ»

Предложенная геомеханическая модель грунтового массива и расчетная схема подрабатываемого грунтового основания позволяет определить основные физико-механические, прочностные и геометрические параметры системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном», которые необходимо контролировать в процессе устранения крена строительного объекта.

В качестве основных расчетных параметров принимаются: толщина грунтового основания; толщина грунтовой стенки между ленточным фундаментом и котлованом, глубина котлована; глубина заложения, шаг, диаметр цилиндрических скважин; ширина пластических кольцевых областей, возникающих вокруг цилиндрических скважин после их бурения.

Определим физическую толщину грунтового основания, с учетом крена здания, на основе методики, использованной при решении задачи Ренкина [4]:

$$H_0 = \frac{P \sin(\varphi - \delta)}{\gamma \sin(\alpha - \varphi)} \quad (1)$$

где H_0 – физическая толщина грунтового основания; α – угол наклона фундамента; δ – угол между нормалью к поверхности грунтового основания и направлением действия внешней полосовой нагрузки P ; γ , φ – удельный вес и угол внутреннего трения грунта.

Ширина грунтовой стенки определяется по формуле:

$$b_c > \frac{D_p + b_p - b_f}{2} \quad (2)$$

где D_p – диаметр окружности развития пластических областей; b_p – ширина пластической области в грунте в зоне отрывки котлована; b_f – ширина фундамента.

Исходной величиной, для расчета диаметра горизонтальных цилиндрических скважин, является эпюра осадки ленточного фундамента, полученная по результатам геодезической съемки высотного положения здания до начала работ по устранению его сверхнормативного крена.

Технологические параметры системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном» взаимосвязаны между собой следующим основным соотношением:

$$d^2 = st \quad (3)$$

где s – требуемая технологическая осадка; d , t – диаметр и шаг горизонтальных цилиндрических скважин.

Для исключения взаимодействия кольцевых пластических областей, сформированных вокруг пробуренных горизонтальных цилиндрических скважин, они должны быть разделены участком (целиком) грунта, работающего в упругой фазе. Ширина целика выбирается из условия, что при внешней нагрузке в нем должны возникать напряжения не больше величины расчетного сопротивления грунта.

С учетом вышесказанного шаг скважин в ряду определяется из условия:

$$t \geq d_{var} + 2\Delta_c + l_y, \quad (4)$$

где d_{var} – варьируемый диаметр скважин; Δ_c – ширина пластической кольцевой области грунта вокруг скважин; l_y – ширина упругого участка грунтового целика в направлении вертикальной оси асимметрии.

Зная шаг скважин и требуемую величину технологической осадки можно определить из (3) необходимый диаметр скважин:

$$d = \sqrt{S(d_{var} + 2\Delta_c + l_y)} \quad (5)$$

и соответственно выбрать необходимый диаметр шнеков для механического бурения.

Глубину заложения горизонтальных цилиндрических скважин принимаем исходя из условия, они должны располагаться в максимально сжимаемом слое грунта, но при этом не должны пересекать начальных пластических областей, сформированных у граней фундамента (рис. 2):

$$h_c > H_1, \quad (6)$$

где h_c – глубина заложения скважин; H_1 – высота начальных пластических областей формирующиеся у грани фундамента.

Для определения текущего характера напряженно-деформируемого состояния подрабатываемого грунтового основания введем коэффициент идентификации:

$$K_i = \frac{V'}{V''}, \quad (7)$$

где: V' – суммарный объем областей в грунтовом основании находящиеся в упругом состоянии; V'' – тоже в пластическом.

При выполнении условия $K_i \geq 10$ грунтовое основание работает по упруго-деформируемой линейной модели [5] и следовательно невозможна потеря устойчивости фундамента при производстве работ по устранению его сверхнормативного крена.

Для практической реализации способа идентификации напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунта разработан алгоритм определения ширины пластической зоны вокруг контура цилиндрический скважин. Ранее [6] получено аналитическое решение задачи о распределении напряжений и деформаций вокруг круглого отверстия в идеальной упруго - пластической среде с критерием пластичности Треска. Это аналитическое решение является одним из наиболее точных, поэтому оно может быть использовано на участке ленточного фундамента, где нагрузка меньше величины предельного сопротивления грунта. При больших нагрузках используется численный метод определения ширины пластических зон вокруг цилиндрических скважин.

При устранении крена фундамента бурится один или несколько рядов, содержащих 1...n скважин разного диаметра. Объем пластических областей в грунтовом основании будет равен:

$$V'' = (d + 2\Delta_c)nl, \quad (8)$$

где d – диаметр цилиндрических скважин, Δ_c - ширина кольцевой пластической области вокруг скважин; l , n – длина и количество скважин.

Общий объем грунта, исходя из предложенной расчетной модели, ограничен физической глубиной грунтового основания, длиной скважин и длиной фундамента. Для общего объема грунта запишем:

$$V_0 = H_0 l_f l, \quad (9)$$

где H_0 – физическая глубина грунтового основания, l_f – длина фундамента, l – длина скважин.

С учетом формул (8), (9) получим для упруго деформированного объема грунта:

$$V' = V_0 - V'' = H_0 l_f l - (d + 2\Delta_c)nl. \quad (10)$$

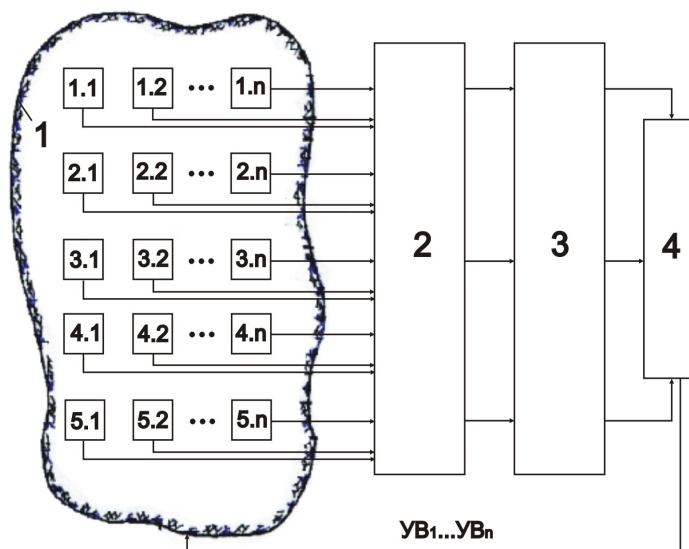


Рис. 4 Структурная схема автоматического устройства для контроля параметров расчетной модели и идентификации характера напряженно-деформированного состояния в грунтовом основании: 1 – здание с креном; 2 – блок измерения и обработки сигналов; 3 – блок расчета геометрических, физико - механических параметров грунтового основания и его идентификации по напряженно-деформируемому состоянию; 4 – блок формирования управляющих воздействий $UB_1...UB_2$ для коррекции технологического процесса устранения крена; 1.1...1.n; 2.1...2.n; 3.1...3.n; 4.1...4.n; 5.1...5.n соответственно измерительные преобразователи толщины грунтовой стенки, диаметра скважин, осадки, крена фундамента и выпора грунта.

5. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПОДРАБАТЫВАЕМОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

При устранении сверхнормативных кренов зданий и сооружений часто возникают расхождения в величинах их фактических и прогнозируемых параметров, например, технологическая осадка и крен строительного объекта. Поэтому в проектах необходимо предусматривать дополнительные инженерные мероприятия: мониторинг в режиме реального времени, технологические приемы регулирования осадок по расчетной эпюре и др. Это позволит на всех этапах выполнения работ по устранению крена здания обеспечивать равенство прогнозируемых и фактических деформаций системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном».

Для предложенной расчетной модели системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном» основными контролируемыми параметрами являются:

- толщина грунтовой стенки между фундаментом и котлованом, глубина котлована;
- глубина заложения, диаметр, шаг цилиндрических скважин;
- характер изменения технологических осадок и крена фундамента;
- коэффициент идентификации подрабатываемого грунтового основания;
- величина выпора грунта в зоне ленточного фундамента.

Для мониторинга вышеуказанных параметров разработана структурная схема автоматизированного их контроля (рис.4).

При построении структурной схемы контроля текущих параметров расчетной модели использованы электромаг-

нитные бесконтактные измерительные преобразователи. Это позволяет определять как абсолютную величину крена, так и его направление. При решении задачи, связанной с контролем технологических осадок грунта, достигающих нескольких десятков сантиметров, в процессе выравнивания крена фундамента, используется бесконтактный проходной электромагнитный датчик, совмещенный с ферромагнитным поплавком. В конструкции индикатора контроля момента возникновения выпора грунта использованы бесконтактные индуктивные датчики смещения, состоящие из двух ферромагнитных частей, закрепленных соответственно на поверхности грунта фундамента и на боковой поверхности ленточного фундамента. Размещение таких датчиков по длине фундамента позволяет контролировать начальный момент выпора грунта, который соответствует переходу в пластическое состояние.

Универсальная структурная схема включает блок непрерывного расчета напряженно-деформированного состояния грунта в технологическом процессе устранения крена фундамента, а также блок формирования текущих управленческих команд. Это позволяет определять локальные зоны грунта, требующих управленческого воздействия, например, изменения коррекции технологических осадок под подошвой ленточного фундамента и др.

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненной классификации технологий используемых при устранении кренов зданий и сооружений выбран наиболее рациональный способ подработки грунтового основания – механическое бурение горизонтальных цилиндрических скважин.
2. Предложены геомеханическая и расчетная модели системы «подрабатываемое грунтовой массив (основание) – ленточный фундамент с креном» позволяющие учитывать физическую глубину грунтового основания.
3. Реализован способ идентификации напряженно – деформированного состояния системы «подрабатываемое грунтовой массив (основание) – ленточный фундамент с креном» на основе коэффициента идентификации, учитывающего соотношение величин упругого и пластического объемов деформированного грунта.
4. Разработана структурная схема автоматической системы управлением технологическим процессом на основе формирования управленческих команд, с учетом текущего контроля и расчета основных параметров расчетной модели и результатов идентификации напряженно-деформированного состояния системы «подрабатываемое грунтовой массив (основание) – ленточный фундамент с креном».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maffei C.E., Concalves H.Y.S., Pimenta P.M., Muracami C.A. The plumbing of 2,20 inclined tall building // The first international conference of the Third Millennium: XV international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 27-31 August 2001. – Istanbul, 2001. – Vol. 3. – P.1799-1802.
2. Shokarev V., Havkin A., Kurkin N., Kuznetsov R., Hilko S. Urban infrastructure objects monitoring on territories formed by loess soil // Active geotechnical design the XIII Danube European Conference on Geotechnical Engineering, 29-31 May 2006. – Ljubljana, 2006. – Vol.2. – P.499-502.
3. P.I.Krivoshcheyev, G.M. Grigor'ev. A.S.Tregub, I.N. Moskalina, A.A. Petrakov Geotechnical protection techniques for buildings adjacent to site territories // Geotechnology in Harmony with the Global Environment: Proceedings of the XVI International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 12-16 September 2005. – Osaka, 2005. – Vol.4. – P.2824-2824.
4. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1971. – 320с.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 488с.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Надра, 1987. 221с.