

## Инженерный метод расчета нагрузок на сваи, устраиваемых с применением JET технологий для усиления фундаментных плит

А.Г. Малинин, канд.техн.наук, технический директор  
С.А. Чернопазов, докт.техн.,наук, руководитель НИО  
ЗАО «ИнжПроектСтрой»

*Точечная застройка городов в условиях ограниченных строительных площадок и их примыкания к существующим зданиям и сооружениям затрудняет или делает невозможным применение стандартных решений при проектировании и строительстве зданий. Все чаще в настоящее время строительство зданий в стесненных условиях производится на фундаментных плитах. Современная архитектура зданий, стремление инвесторов максимально удешевить проектные и строительные работы, сложные грунтовые условия, взаимное влияние осадок существующих и проектируемых зданий, необходимость принимать нестандартные решения при проектировании приводят к риску возникновения аварийных ситуаций.*

Один из примеров возникновения аварийной ситуации вследствие не учета в проектных работах внецентренной нагрузки на плиту фундамента авторами статьи проанализирован в [1]. Напомним, что построенный десятиэтажный жилой дом примыкает двумя смежными стенами к глухим торцовым стенам кирпичного пятиэтажного жилого дома и одноэтажной пристройки в центральном районе города.

В плане дом сложной формы с габаритными размерами: длина – 18 м, ширина – 18 м, высота до верха парапета от планировки – 33 м. Фундамент здания – монолитная железобетонная плита толщиной 0,7 м. Причина внецентренной нагрузки на плиту фундамента – использование монолитных железобетонных балок по двум осям фундаментной плиты с консольным вылетом 1630 мм.

В связи с возникшей аварийной ситуацией во время строительства здания перед организацией «ИнжПроектСтрой» была поставлена задача найти, обосновать и реализовать техническое решение по усилению фундамента с целью остановки прогрессирующего крена фундамента здания.

### **Анализ сложившейся аварийной ситуации показал следующее:**

- давление в угловой точке фундамента по разным оценкам, полученным расчетными методами с использованием программ «Ли́ра» и «SCAD», достигает до 0,63 МПа, что значительно превышает допустимое значение  $1,5R$  (СП 50-101-2004, п. 5.5.26). Расчетное сопротивление грунта основания по данным геологических изысканий 2004 г. и 2006 г. составляет  $R = 0,24 - 0,4$  МПа;

- значения крена, рассчитанного по СП 50-101-2004 (п. 5.5.44) составляет  $i_u=0,042$ , по расчету в «SCAD» -  $i_u=0.0126$ , что превышает допустимое значение  $i_u=0,005$ ;
- фактические осадки в углах фундамента на 7.06.2006 г. составили 170 мм, 290 мм и 220 мм.

### **Техническое решение по усилению фундамента**

Для усиления фундамента было принято решение устроить вертикальные сваи под подошвой фундаментной плиты и связать их с консолями железобетонным ростверком. Выбор типа буровых свай и технологии их устройства выполнены по критерию минимального негативного воздействия на основание фундамента во время производства работ. Длина свай рассчитана из условия заделки нижнего конца свай в нижележащие несущие грунты. Дополнительной опрессовка свай значительно повышает несущую способность. Сваи, устроенные по предложенной технологии, имеют высокий показатель жесткости, необходимый для предотвращения прогрессирующих неравномерных осадок фундаментной плиты.

***Задача проектирования усиления фундаментной плиты с системой дополнительно устроенных свай с точки зрения методов СНиП может быть отнесена к категории нестандартных в силу следующих причин:***

- сложная форма плиты фундамента;
- по результатам геологических изысканий 2004 и 2006 гг. грунтовые условия являются нестабильными или существенно неоднородными в плане плиты фундамента;
- в связи с требованиями минимизации затрат на усиление фундамента в сочетании с ограниченной возможностью закрепления свай в теле фундамента техническое решение предусматривает только частичное усиление основания плиты фундамента в области повышенных осадок. Это делает основание плиты существенно неравножестким и затрудняет применение простейших расчетных формул (например, формул (3) в п.3.11 СНиП 2.02.03-85).

Центральным этапом в проектных расчетах усиления фундамента системой микросвай является расчет продольных сил в дополнительных сваях, а также расчет предельных осадок фундамента после вступления МС в работу.

### **Метод расчета продольных усилий в сваях**

Предлагаемый метод предназначен для определения продольных усилий в системе свай, скрепленных с плитой фундамента, и остаточного давления в уровне подошвы фундамента после вступления свай в работу.

Метод расчета разработан с применением линейной неоднородной по деформационным показателям модели основания (грунтовый массив, армированный сваями).

**Метод использует следующие допущения.**

- Сваи, устроенные для усиления фундамента, после вступления в работу передают часть нагрузки от веса здания на глубокие слои грунтового массива и тем самым снижают давление на грунт на уровне подошвы фундамента.

- Суммарная нагрузка на подошву фундамента уменьшается на величину суммарных продольных усилий, воспринимаемых системой свай.

- Реологические процессы в грунтовом массиве направлены на установление равновесного состояния, если остаточное давление на грунт не будет превышать расчетного сопротивления грунта R.

- Остаточное усилие на грунт на уровне подошвы фундамента может быть найдено как разность между нагрузкой на основание фундамента и суммой продольных усилий в микросваях.

Величина продольного усилия в сваях определяется через продольную жесткость свай по формуле:

$$N = E_s(U - U^o),$$

где  $E_s$  - модуль жесткости сваи,  $U$  - вертикальное смещение фундамента в месте установки сваи,  $U_o$  – вертикальное смещение фундамента на момент времени устройства сваи,  $U - U^o$  - величина осевого смещения оголовка сваи.

**Вертикальные смещения точек плиты фундамента найдем как сумму:**

- осадки  $U_c$  центра тяжести плиты, обозначенного точкой С на рис. 1;
- смещений за счет поворота плиты фундамента вокруг оси  $x$ ;
- смещений за счет поворота плиты фундамента вокруг оси  $y$  (см. рис. 1).

Формула для нахождения алгебраической величины вертикального смещения точки с координатами  $x, y$  записывается в виде:

$$U_z = U_{cz} + yj_x - xj_y, \quad (1)$$

где  $U_{cz}$  - проекция смещения центра масс плиты на вертикальную ось  $z$ ,  $j_x$  и  $j_y$  - углы поворота плиты. Эти параметры приняты в качестве обобщенных координат, определяющих движение плиты фундамента как твердого тела.

По формуле (1) также находятся смещения точек плиты  $U^o$  на момент времени устройства МС:

$$U_z^o = U_{cz}^o + yj_x^o - xj_y^o.$$

**Для нахождения осадок плиты фундамента рассмотрим систему уравновешенных сил, приложенных к плите. Система включает:**

- равнодействующую от веса дома, приложенную в точке О;

- продольные реакции МС  $R_k$  ( $k = 1 \dots n$ , где  $n$  – количество микросвай), численно равные продольным силам  $N_k$ .
- реакция грунта на уровне подошвы фундамента, определяемая с помощью модели Винклера:

$$q_z = -CU_z. \quad (2)$$

Для системы уравновешенных сил составим уравнения:  
сумма проекций сил на ось  $z$

$$\sum_{k=1}^n R_{kz} - F + \int_A q_z dA = 0, \quad (3)$$

сумма моментов сил относительно оси  $x$

$$\sum_{k=1}^n y_k R_{kz} + m_x(F) + \int_A y q_z dA = 0, \quad (4)$$

сумма моментов сил относительно оси  $y$

$$\sum_{k=1}^n -x_k R_{kz} + m_y(F) + \int_A (-x q_z) dA = 0. \quad (5)$$

При устройстве одинаковых свай в одинаковых грунтовых условиях проекции реакций МС на ось  $z$  определяется формулой:

$$R_{kz} = -E_s(U_{kz} - U_{kz}^o) = -E_s(U_{cz} + y_k j_x - x_k j_y - U_{kz}^o). \quad (6)$$

**Алгоритм подбора параметров усиления фундамента системой МС включает следующие шаги:**

- Разрабатывается проект усиления фундамента, в котором определяется несущая способность свай, их количество и положение осей относительно плиты фундамента.
- Выполняется расчет осадок фундамента на момент времени устройства свай. Коэффициент постели подбирается таким, чтобы расчетные осадки имели минимальные отклонения от полученных в результате измерений. Значение коэффициента постели при этом должно превышать расчетное, найденное по модулям деформаций грунтов. Выполнение этого условия указывает на то, что в момент времени устройства свай грунты основания еще полностью не консолидированы.
- Выполняется расчет предельных продольных усилий в сваях, остаточного давления на основание фундамента и предельные осадки для консолидированных грунтов. Для решения этой задачи задается расчетное значение коэффициента постели основания, найденное по модулям деформаций грунтов (т.е. значение коэффициента постели для консолидированных грунтов).
- Выполняется проверка свай по несущей способности и принимается решение об утверждении или изменении положения и количества свай.

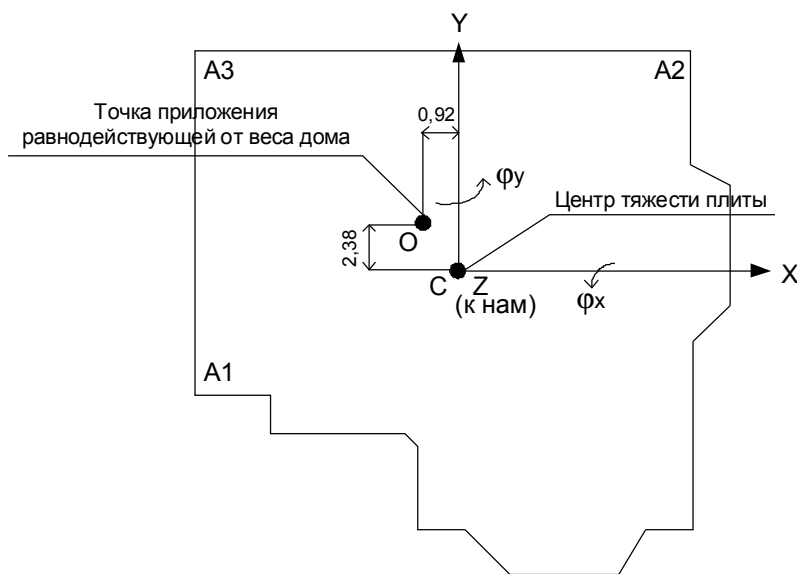


Рис. 1. Обобщенные координаты, задающие движение плиты фундамента как твердого тела

### Расчеты продольных усилий в запроектированных микросваях с учетом грунтовых условий под плитой фундамента

Для усиления фундамента предложено использовать сваи с несущей способностью не менее 50 тс. С применением метода конечных элементов найдены расчетные значения коэффициента постели основания фундамента  $C = 135,66 \text{ тс/м}^2$  и модуля жесткости  $MC E_s = 4386 \text{ тс/м}$ .

Предельная осадка центра тяжести плиты не усиленного фундамента составит

$$u_c^\infty = \frac{F}{A \cdot C} \approx 0,234 \text{ м}$$

что значительно превышает допустимую СНиП - 0,15 м.

Среднее по площади плиты фундамента давление на грунт равно

$$\langle q \rangle = \frac{F}{A} = C u_c^\infty = 31,7 \text{ т/м}^3.$$

На начало ноября 2006 года осадка плиты в точке А3 (рис. 1) составила 37 см.

Вертикальные смещения плиты фундамента моделировались подбором значения коэффициента постели  $C$ . Данные для расчета приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

Исходные данные для расчета осадки плиты фундамента

Обозначение	Ед. изм.	Значение
$m_x(F)$	тм	-20468
$m_y(F)$	тм	-8426
A	м <sup>2</sup>	270
n	-	49
$E_s$	-	0
C	тс/м <sup>2</sup>	180

Решение системы уравнений (1)-(6) относительно обобщенных координат приведено в таблице 2. Расчетные осадки в угловых точках плиты фундамента при коэффициенте постели основания  $C = 180 \text{ т/м}^2$  приведены в таблице 3. Расчетное смещение центра тяжести плиты составило  $U_c = 0,177 \text{ м}$  при возможном предельном значении  $U_c^\infty = 0,234 \text{ м}$ .

**Таблица 2**

Обозначение	Ед. изм.	Значение
$U_{cz}$	м	-0,177
$\varphi_x$	рад	-0,0194
$\varphi_y$	рад	-0,00403

**Таблица 3**

Точка	Давление на грунт q, МПа	Осадка $U_z$ , м
A1	0,25	0,139
A2	0,54	0,300
A3	0,66	0,369

Предельная осадка фундамента дома после устройства свай (работы по усилению фундамента произведены в ноябре 2006 г) моделировалась коэффициентом постели  $C=135,66 \text{ т/м}^2$ , т.е. определялось предельное состояние грунтового массива и МС в рамках линейной модели деформирования основания фундамента.

Решение системы уравнений относительно обобщенных координат приведено в таблицах 4, 5. Смещение центра тяжести плиты составило  $U_c = 0,200 \text{ м}$ .

**Таблица 4**

$U_{cz}$	-0,200	м
$\varphi_x$	-0,0169	рад
$\varphi_y$	-0,00371	рад

**Таблица 5**

Точка	Давление на грунт $q$ , МПа	Осадка $U_z$ , м
A1	0,229	0,200
A2	0,415	0,306
A3	0,500	0,369

Расчетное давление на основание фундамента по его краю между точками А2-А3 (рис. 1) составляет  $q = 0,415-0,500$  МПа, что превышает расчетное сопротивление грунта  $1,2R = 1,2(0,24 - 0,4) = 0,288 - 0,480$  МПа; Некоторые МС, расположенные вдоль этой линии, являются не догруженными (таблица 6). Т.к. вертикальные смещения плиты вдоль рассматриваемой линии заблокированы продольной жесткостью МС, то с течением времени будет происходить релаксация напряжений в грунте и загрузка МС.

**Таблица 6**

№ сваи	Осадка $U_z$ , м	Реакция (продольная сила) $R_z$ , тс
6	-0.367	-2
11	-0.361	0
21	-0.346	6
26	-0.339	9

Усилия в максимально загруженных сваях приведены в таблице 7.

**Таблица 7**

№ сваи	Осадка $U_z$ , м	Реакция (продольная)
36	-0.282	56
37	-0.278	57
38	-0.272	59
39	-0.270	60

## Натурные данные по осадке фундамента во время производства работ по устройству свай

Наблюдения за осадками построенного дома показали незатухающую тенденцию их нарастания с кратковременными увеличениями скоростей осадок в мае и сентябре 2006 г. Наблюдения за дополнительными осадками накануне и во время производства работ по устройству свай приведено на рис. 2.

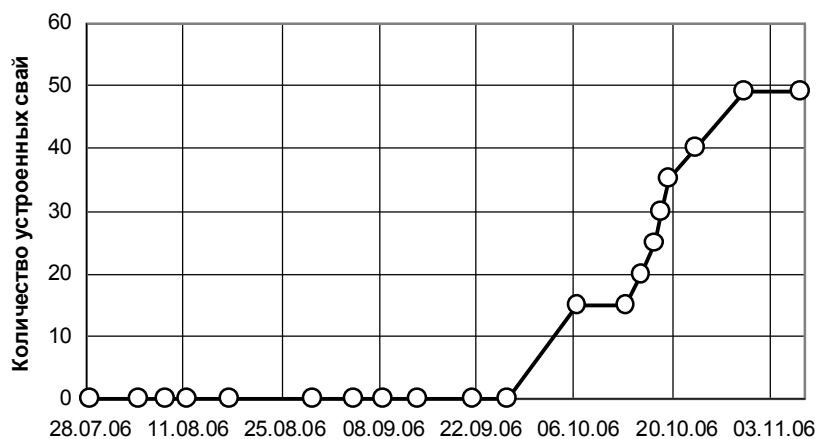
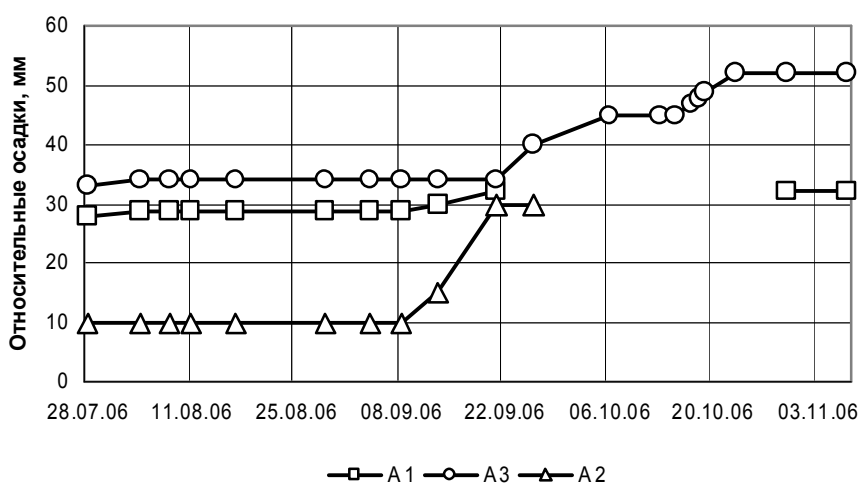


Рис. 2. Графики дополнительных осадок фундамента и производства работ по устройству свай

## Выводы



1. Анализ в линейной постановке предельных осадок плиты фундамента и работы свай показал, что смещения точки А3 полностью устраняются (см. рис. 1, таблицы 3 и 5). Предельное смещение в этой точке фундамента не превысит смещения на момент времени завершения устройства МС.

2. Смещение точки А2 фундамента после устройства свай не превысит 6 мм.

3. Максимально возможное смещение точки А1 – 6 см.

4. Зависимость дополнительных осадок имеет корреляцию с графиком производства работ по усилению фундамента. Максимальная дополнительная осадка за время производства работ не превысила 2 см (рис. 2).

5. После устройства свай осадки фундамента стабилизировались (рис. 2), что подтверждает правильность предложенной расчетной методики и принятых решений.