

Расчеты на устойчивость

ОБЩАЯ БИФУРКАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ КРЕНА ВЫСОТНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.К. ИНОЗЕМЦЕВ, доктор технических наук, профессор

Е.А. НАЩИНЦЕВ, аспирант

Саратовский государственный технический университет.

410054, Саратов, ул. Политехническая д. 77,

Тел.: +7-927-126-41-31; E-mail: naschintsew@mail.ru

В статье рассматриваются результаты расчета критической нагрузки для системы «высотный объект-основание». Приведено сравнение результатов расчета компьютерной модели, выполненной в программном комплексе МОНОМАХ, с аналитическими линеаризованными уравнениями устойчивости высотного объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: критическая нагрузка, нелинейность, точка бифуркации, начальное несовершенство, высотный объект.

Деформируемое основание высотного здания, особенно башенного типа, оказывает большое влияние на его общую бифуркационную устойчивость. Связано это с тем, что высотное здание создает значительное по величине давление на основание. Очевидно, что для высотного здания одна из важных проблем это его бифуркационная устойчивость, обеспечивающая общую устойчивость исходного строго вертикального состояния равновесия каркаса здания по отношению к смежным равновесным состояниям, характеризующимся эксцентриситетами центра сил тяжести. Если общая устойчивость высотного здания обеспечена, то «несовершенства» строительного производства в виде кренов и деформаций не получают значительного развития [2,3,4].

В качестве примера рассмотрим плоскую расчетную схему (Рис. 1). В данном случае в качестве независимого параметра перемещений прием угол поворота объекта в вертикальной плоскости. Возмущение выбранного параметра перемещений, приводящее к потере симметрии «отпора» основания под фундаментной конструкцией, позволяет получить уравнения общей устойчивости системы «высотный объект – деформируемое основание» с позиций бифуркационного подхода.

Потеря симметрии «отпора» основания под фундаментной конструкцией в результате возмущения выбранного параметра перемещений приводит в случае модели основания Винклера к трапецевидной эпюре «отпора» основания (рис. 1). Условия равновесия позволяют получить приращения пары равнодействующих реактивных сил отпора ($\Delta R_n, \Delta S_n$) и приращения осадок ($\Delta \delta_{Rn}, \Delta \delta_{Sn}$), вызванных приращением силы ΔP для n -го шага нагружения (1):

$$\begin{aligned} \Delta \delta_{Rn} &= \Delta R_n \frac{2}{kF} = \frac{\Delta P_n}{kF} \left\{ \left(1 - \frac{6}{a} \sum_{i=0}^n \Delta \mathcal{E}_i \right) - \frac{3\Delta \mathcal{E}_n}{a} \sum_{i=1}^n \Delta P_i \right\}; \\ \Delta \delta_{Sn} &= \Delta S_n \frac{2}{kF} = \frac{\Delta P_n}{kF} \left\{ \left(1 + \frac{6}{a} \sum_{i=0}^n \Delta \mathcal{E}_i \right) + \frac{3\Delta \mathcal{E}_n}{a} \sum_{i=1}^n \Delta P_i \right\}; \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь: $\mathcal{E}, \Delta \mathcal{E}_n$ - эксцентриситет центра сил тяжести и его приращение на n -ом шаге нагружения, F - площадь фундаментной конструкции, k - коэффициент Винклера.

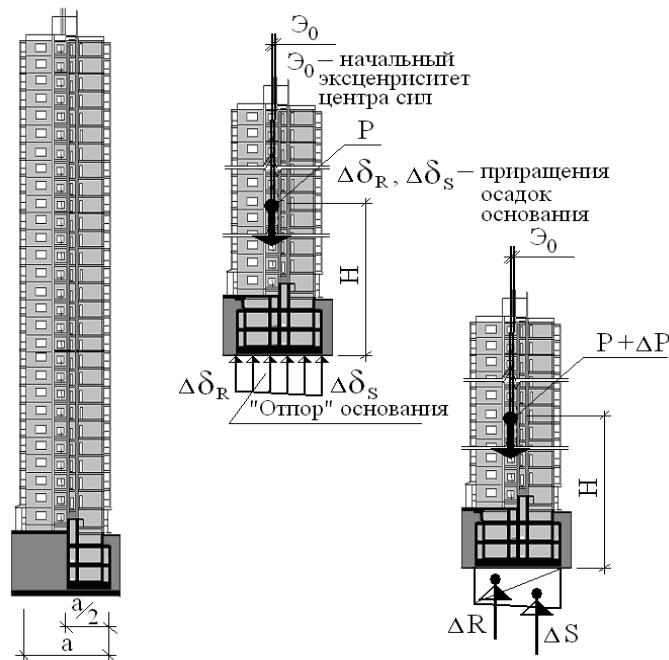


Рис. 1.

Сопоставим результаты расчета деформаций крена высотного объекта на основе аналитического решения (1) и на основе компьютерного моделирования, на базе расчетного комплекса МОНОМАХ 4.0. В компьютерной модели для получения деформаций основания под фундаментной плитой в соответствии с моделью Винклера (коэффициент Винклера $k = C_1 = 6000 [\text{kH}/\text{m}^3]$ в обозначениях программного комплекса Мономах 4.0) примем толщину фундаментной плиты 2м, что позволит устранить влияние второго коэффициента жесткости основания C_2 , принимая $C_2 = 10 [\text{kH}/\text{м}]$, так как нулевое значение этого коэффициента программным комплексом не предусмотрено (рис. 2). Другие параметры модельной задачи приведены в табл. 1. Результаты расчета деформаций крена приведены в табл. 2. Таким образом, развитие эксцентриситета высотного объекта \mathcal{E} (деформаций крена) идентично для аналитического решения и компьютерной модели с точностью до долей процента (табл. 2).

Развитие деформаций, полученное по аналитической и компьютерной моделям, не связано с потерей общей устойчивости процесса деформирования системы «высотное здание – деформируемое основание» [5].

Построим на базе модели основания Винклера систему линеаризованных уравнений общей устойчивости процесса деформирования системы «высотный объект – деформируемое основание».

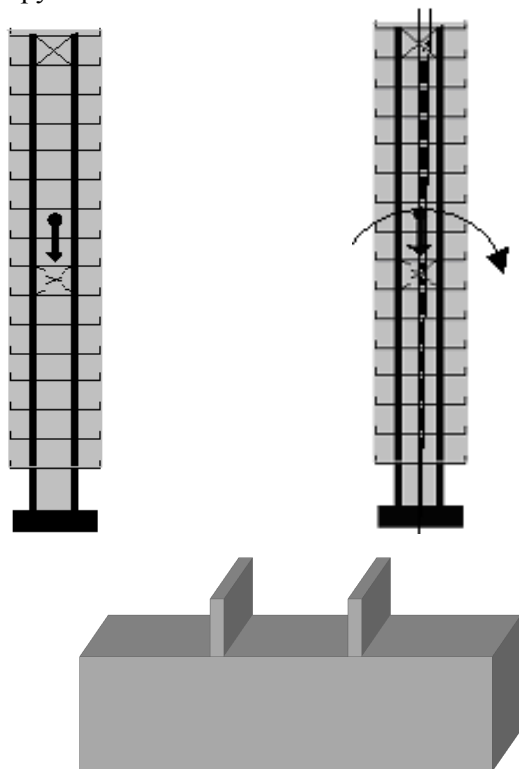


Рис. 2. Плоская расчетная схема в программе MOHOMAX 4.0

Таблица 1

Шаг по нагрузке P [кН]	125
Размер фундаментной плиты a [м]	6
Ширина фундаментной плиты b [м]	1
Начальный эксцентриситет центра сил тяжести Θ_0 [м]	0.001
Высота центра сил тяжести H [м]	30
Коэффициент Винклера k [кН/м ³]	6000

Таблица 2

P [кН]	Компьютерная модель Θ [м]	Аналитическое решение Θ [м] по (1)	%
1000	0.001364	0.0013649	0.066456
2000	0.0020865	0.0020883	0.087222
3000	0.0038335	0.0038389	0.140896
4000	0.0095965	0.0096210	0.25441
5000	0.038635	0.0387992	0.423264

Неоднородная система линеаризованных уравнений относительно приращений осадок основания имеет вид:

$$\left(1 - \frac{P H}{2 kJ}\right) \Delta \delta_R + \frac{P H}{2 kJ} \Delta \delta_S = \frac{\Delta P_n}{kF} \left(1 - \frac{6}{a} \sum_{i=1}^n \Delta \mathcal{E}_i\right);$$

$$\frac{P H}{2 kJ} \Delta \delta_R + \left(1 - \frac{P H}{2 kJ}\right) \Delta \delta_S = \frac{\Delta P_n}{kF} \left(1 + \frac{6}{a} \sum_{i=1}^n \Delta \mathcal{E}_i\right), \quad (2)$$

здесь J – момент инерции площади фундаментной конструкции.

Особая точка решения, соответствующая бифуркации решения для идеализированной расчетной схемы при отсутствии начального эксцентриситета $\mathcal{E}_0 = 0$, получается из условия равенства нулю определителя системы [1] (2):

$$P_{kp} = \frac{kJ}{H}. \quad (3)$$

Система уравнений (2) позволяет проследить процесс нагружения системы «высотный объект - основание» при исследовании ее общей устойчивости и находить критическую нагрузку из условия $\mathcal{E} \rightarrow \infty$.

В качестве модельного примера для параметров, приведенных в табл. 1, сопоставим результаты расчета деформаций крена высотного объекта с использованием аналитического решения (1) и компьютерной модели МОНОМАХ 4.0 (табл. 2) с результатами аналитического решения (2) для линеаризованных уравнений общей устойчивости высотного объекта (рис. 3).

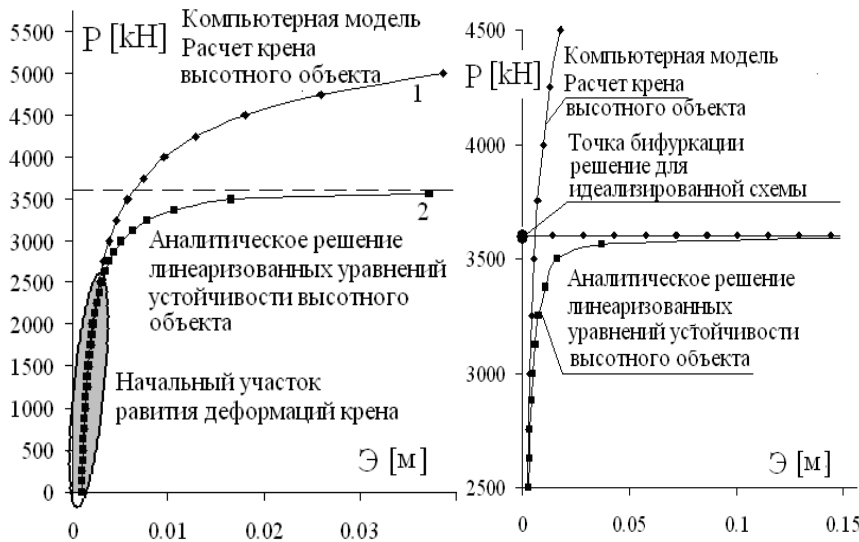


Рис. 3.

Рис. 4.

Отметим, что результаты расчетов развития деформаций крена совпадают на начальном участке нагружения высотного объекта. Однако, при приближении уровня нагружения к бифуркационной критической нагрузке результаты расчета существенно различаются.

Кривая 2 на рис. 3 в отличие от кривой 1 асимптотически приближается к уровню соответствующему бифуркационной критической нагрузке потери устойчивости исходного строго вертикального положения равновесия ($\mathcal{E}_0 = 0$) высотного объекта.

На рис. 4 показано поведение решений, для высотного объекта с начальными несовершенствами ($\mathcal{E}_0 \neq 0$) в окрестности точки бифуркации исходного равновесного состояния идеализированного ($\mathcal{E}_0 = 0$) высотного объекта.

Таким образом, для многоэтажного здания вес надземной части и высота которого не столь значительны результаты расчета деформаций крена по компьютерной модели и по аналитическому решению линеаризованных уравнений устойчивости совпадают (начальный участок развития деформаций крена) (рис.3).

При проектировании высотного объекта (в частности высотного здания или сооружения) его предельная высота (соответственно и вес надземной части) ограничена уровнем общей бифуркационной устойчивости.

В связи с этим определение бифуркационной критической нагрузки и сопоставление ее с весом надземной части высотного объекта имеет важное практическое значение при расчетах деформаций крена.

Литература

1. Коллатц Л. Задачи на собственные значения / Л. Коллатц. М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. Лит., 1978. – 501 с.
2. Ржаницын А.Р. К вопросу о теоретическом весе стержневых конструкций; Сборник под ред. А.А. Гвоздева, И.М. Рабиновича М.М. Филоненко-Бородича, Исследования по теории сооружений, вып. IV(1949).
3. Belostotsky A. Dip Angle of Capital Gate // Tall buildings. – 2014. – № 1. – Pp. 94-98.
4. Schofield J. Loads Numerical Simulation // Tall buildings. – 2012. – № 3. – Pp. 86-94
5. Иноземцев В.К. Общая устойчивость сооружений на неоднородном нелинейно-деформируемом основании: монография / В.К. Иноземцев, Н.Ф. Синева, О.В. Иноземцева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. – 242 с.
6. Иноземцев В.К., Иноземцева О.В., Нащичинцев Е.А. (2013). Многоэтажные и высотные здания. Бифуркационный критерий общей устойчивости. Расчетные комплексы MONOMAX 4.0 и ЛИРА 9.6// Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвуз. научн. сб. – Саратов: СГТУ, с. 80-102.

References

1. Kollatts, L. (1978). *Zadachi na Sobstvennyye Znacheniya*, Moscow: "Nauka", 501 p.
2. Rzhaniysyn, A.R. (1949). K voprosu o teoreticheskom vese sterzhnevyykh konstruktсий, *Issledovaniya po Teorii Sooruzheniy*: Sbornik pod red. A.A. Gvozdeva, I.M. Rabinovicha, M.M. Filonenko-Borodicha, Iss. IV.
3. Belostotsky, A. (2014). Dip Angle of Capital Gate, *Tall buildings*, №1, pp. 94-98.
4. Schofield J. (2012). Loads Numerical Simulation, *Tall buildings*, № 3, pp. 86-94.
5. Inozemtsev, V.K., Sineva, N.F., Inozemtseva, O.V. (2008). *Obshchaya Ustoychivost Sooruzheniy na Neodnorodnom Nelineynno-Deformiruyemom Osnovanii*: Monografiya, Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 242 p.
6. Inozemtsev V.K., Inozemtseva V.K., Nashchintsev Ye.A. Mnogoetazhnyye i vysotnyye zdaniya. Bifurkatsionnyy kriteriy obshchey ustoychivosti. Raschetnyye komplekсы MONOMAXh 4.0 i LIRA 9.6. // Problemy prochnosti elementov konstruktсий pod deystviyem nagruzok i rabochikh sred: mezhvuz. nauch. sb. – Saratov: SGTU, 2013. - s. 80-102.

OVERALL BIFURCATION STABILITY AND DEFORMATIONS OF INCLINATION OF TALL BUILDINGS

V.K. Inozemtsev, and Ye.A. Nashchintsev
Saratovskiy Gosudarstvenniy Tehnicheskiy Universitet, Saratov

The article discusses the results of calculation of the critical load for the system "high-altitude object - base". The comparison of the results of a computer model calculation, performed in the software package MONOMAX, with the linearized equations of stability of tall objects was fulfilled.

KEYWORDS: critical load, nonlinearity, bifurcation point, the initial imperfection, tall building.