

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Конечно-элементное моделирование совместной работы плитного ростверка и каркаса здания

УДК 624.048

Панасюк Леонид Николаевич

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: panasjuk.leonid@gmail.com

Кравченко Галина Михайловна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Тарба Инал Даурович

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: tarbainal1@gmail.com

Цвейба Лаша Гарикович

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: tsveyba96.96@mail.ru

Статья получена: 15.12.2018. Рассмотрена: 25.12.2018. Одобрена: 31.12.2018. Опубликовано онлайн: 26.03.2019. ©РИОР

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование совместной работы плитного ростверка и монолитного каркаса здания методом конечных элементов. Конечно-элементная модель разработана в пространственной постановке по комплексной схеме «верхнее строение — фундаментная плита — свайное основание». Свайное поле моделировалось подат-

ливыми стержнями с жесткостью, соответствующей средней осадке свайного поля. Статические и динамические расчеты выполнены в программном комплексе ING+. Результаты напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания демонстрируют корректность данного подхода учета податливости основания.

FINITE ELEMENT MODELLING OF INTERACTION BUILDING FRAME AND SLAB-PILE FOUNDATION

Leonid Panasjuk

Doctor of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: panasjuk.leonid@gmail.com

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: Galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Inal Tarba

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: tarbainal1@gmail.com

Lasha Tsveyba

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: tsveyba96.96@mail.ru

Manuscript received: 15.12.2018. **Revised:** 25.12.2018. **Accepted:** 31.12.2018. **Published online:** 26.03.2019. ©РИОР

Abstract. In this article, interaction between superstructure and slab-pile foundation was investigated, in order to evaluate the method of foundation stiffness determination. The finite element model is represented by superstructure-foundation slab-pile foundation system. The pile foundation was modeled by pliable rods with rigidity corresponding to the average draft of the pile foundation. Static and dynamic analyses are performed with using ING+ software. The results of the stress-strain state of the elements of the building framework validate accuracy of the foundation stiffness determination approach to take substructure influence into account.

Keywords: finite element method, finite element model, dynamic analysis, slab-pile foundation, pile foundation.

Ключевые слова: метод конечных элементов, конечно-элементная модель, динамический расчет, плитный ростверк, свайное основание.

При моделировании работы оснований зданий и сооружений используют следующие подходы: в первом проводится переход от пространственной задачи к двумерной (плоская или осесимметричная деформация); во втором работу основания моделируют упрощенной моделью.

Простейшую модель Винклера — Фусса достаточно часто применяют в научных и инженерных расчетах. Модель обладает рядом недостатков, существенным из которых является невозможность учета взаимного влияния различных частей сооружения на основание. Аналогичными недостатками обладает двухпараметрическая модель Пастернака. В рассматриваемых моделях кинематические гипотезы вызывают определенные сомнения.

Для исследования совместной работы плитного ростверка и каркаса здания рассмотрен многоэтажный жилой дом с подземной автостоянкой в г. Таганроге. Подвальный этаж, в котором располагается автостоянка, разделен на две части деформационным швом. Первая надземная часть имеет офисный этаж, 16 жилых этажей и технический этаж. Покрытие второй части подвального этажа используется в качестве дворового пространства с возможностью заезда пожарных машин.

Конструктивная схема здания выполнена с несущим каркасом из монолитных железобетонных конструкций.

Фундаментная плита первой основной части здания толщиной 1500 мм, второй — толщиной 600 мм. Фундаментная плита основной части опирается на свайное поле, фундаментная плита второй части — на подготовленное естественное основание.

Основными несущими элементами каркаса здания являются монолитные колонны сечением 600×600 , 500×500 и 400×400 мм, монолитные диафрагмы жесткости толщиной 200 мм, 300 мм, 400 мм, внешние стены подвала 400 мм, внутренние стены подвала 500 мм и монолитные плиты перекрытий толщиной 250 мм над подвальным этажом и 200 мм над остальными. Все конструктивные элементы

выполнены из бетона В25, арматура продольная класса А400, поперечная — класса А1.

Стены подвального этажа одновременно воспринимают вертикальную нагрузку и нагрузку от обратной засыпки грунта.

Вертикальная нагрузка, действующая на плиты перекрытия и покрытия, распределяется за счет их жесткости на вертикальные элементы — колонны, несущие монолитные стены и диафрагмы жесткости. Горизонтальная ветровая нагрузка воспринимается в уровне плит перекрытий и перераспределяется на диафрагмы жесткости и ядра жесткости в лестнично-лифтовых узлах. Частично горизонтальная нагрузка влияет на перераспределение вертикальных усилий в колоннах и диафрагмах, которые за счет изменения вертикальных усилий также воспринимают часть ветрового момента. Фундаментная плита опирается на свайное основание по схеме высокого ростверка.

Пространственная жесткость и неизменяемость сооружения обеспечивается высокой степенью статической неопределимости, включением в совместную работу всех несущих конструктивных элементов. Стены подвального этажа жестко соединены с перекрытием.

Для решения поставленной задачи применен метод конечных элементов [1]. Существуют различные конечно-элементные комплексы, которые позволяют производить расчет сложных инженерных сооружений на статическое и динамическое воздействие.

В программных комплексах прочностного расчета используется МКЭ в форме метода перемещений, построенная на основе вариационного принципа Лагранжа. Глобальная матрица жесткости ансамбля конечных элементов формируется из локальных матриц жесткости отдельных элементов путем их соединения в общих узлах. Затем учитываются граничные условия (условия опирания и сопряжения элементов). Вектор узловых сил системы строится по заданным внешним узловым воздействиям и распределенных по площади элемента или его граней нагрузок. Неизвестный вектор узловых перемещений определяется в процессе решения системы уравнений метода перемещений. Затем для каждого конечного элемента, используя найденные узловые перемещения, определяют деформации, напряжения. По най-

денным напряжениям определяют интегральные усилия (изгибающие и крутящие моменты, продольные и поперечные усилия).

Расчет выполнен по лицензионной версии программы *ING+*, имеющей сертификат соответствия и верификацию программного комплекса *РААСН*.

Модель разработана в пространственной постановке по комплексной схеме «верхнее строение — фундаментная плита — свайное основание» (рис. 1, а).

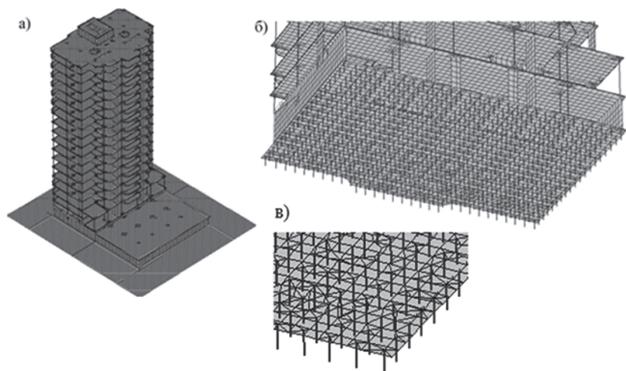


Рис. 1. Конечно-элементная модель: а) общий вид; б) плитный ростверк; в) фрагмент плитного ростверка

В работе при моделировании свайного поля предложено использовать податливые стержни с жесткостью, соответствующей средней осадке свайного основания (рис. 1, б, в) [2; 3].

Статический расчет выполнен на постоянную нагрузку от несущих и ненесущих конструкций, временную (полезную) и снеговую нагрузки. В конечно-элементную модель добавлены данные по статической ветровой нагрузке в различных направлениях.

Выполнен динамический расчет по определению спектра частот и форм собственных колебаний (рис. 2) [4–6]. Для учета инерционных характеристик грунтового массива при решении спектральной задачи жесткость основания принята бесконечной. Спектр частот включает первые две формы — поступательные, третью — крутильную, что соответствует требованиям норм проектирования.

Для учета пульсационной составляющей ветровой нагрузки сформированы исходные данные в соответствии с ветровым районом, геометрическими параметрами здания, типом

местности и конструктивной схемой сооружения (рис. 3) [7; 8].

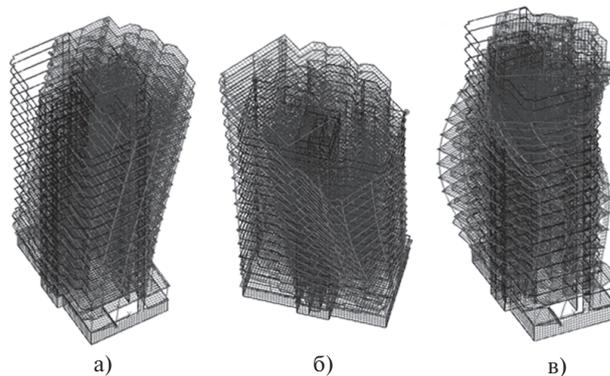


Рис. 2. Характерные формы колебаний: а) поступательная; б) крутильная; в) изгибно-крутильная

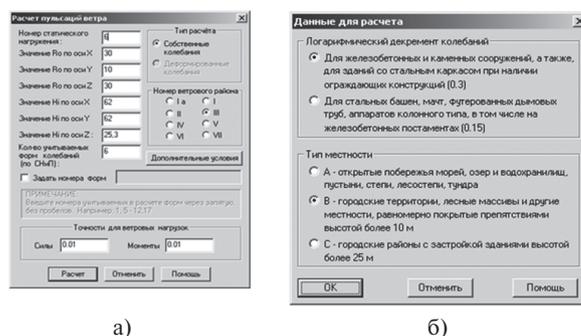


Рис. 3. Параметры определения пульсационных нагрузений: а) основные; б) дополнительные условия

Выполнен статический расчет здания с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки и определены деформации и усилия в элементах каркаса здания (рис. 4).

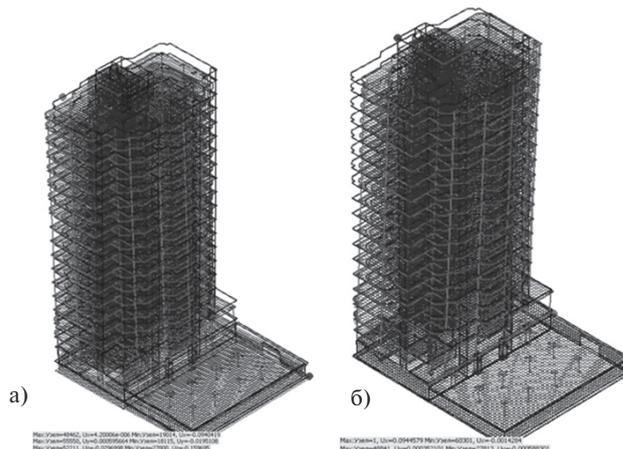


Рис. 4. Деформации здания: а) от полной нормативной вертикальной нагрузки; б) от ветровой нагрузки с учетом пульсационной составляющей

Деформации фундаментной плиты от вертикальной нагрузки изменяются от 85 до 120 мм. Неравномерность осадок — 35 мм. Здание имеет некоторый крен только от вертикальных нагрузок, обусловленный неравномерностью загрузки плиты в плане. Максимальный крен верха здания составляет 94 мм.

От действия ветра (с учетом пульсации) максимальные отклонения верха здания — 95 мм, что не превышает нормативно допустимых значений.

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния плитного ростверка (рис. 6).

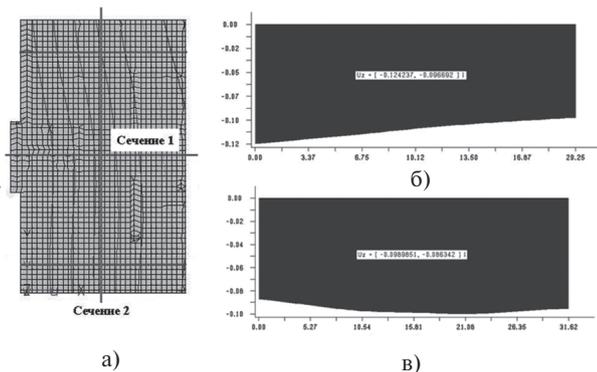


Рис. 5. Вертикальные перемещения плитного ростверка: а) маркировка рассматриваемых сечений; б) сечение 1; в) сечение 2

Деформации фундаментной плиты от вертикальной нагрузки изменяются от 85 до 120 мм.

На рис. 6 показаны изгибающие моменты в плитном ростверке.

В результате расчета определено армирование плитного ростверка (рис. 7.)

Предлагаемый подход моделирования податливости свайного основания жесткими стерж-

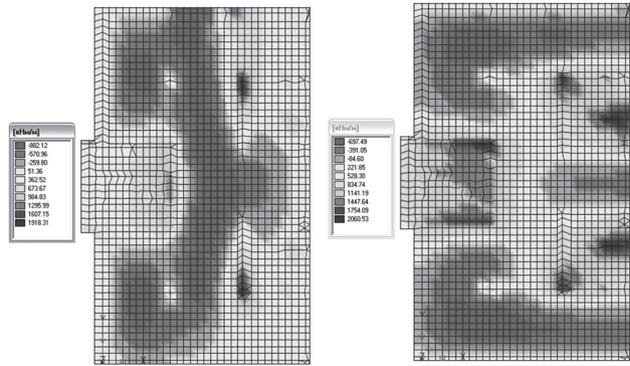


Рис. 6. Изгибающие моменты в плитном ростверке: а) вокруг оси X; б) вокруг оси Y

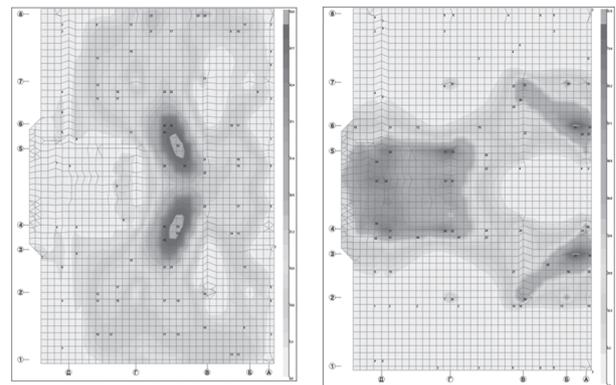


Рис. 7. Армирование плитного ростверка: а) верхняя арматура вдоль оси X; б) нижняя арматура вдоль оси Y

нями ростверка позволяет корректно определить изгибающие усилия и правильно рассчитать армирование фундаментной плиты, в то время, как нормативная равномерная осадка свайного поля не учитывает эти усилия и неравномерные деформации.

Литература

1. *Batht K.-J.* Finite Element Procedures. K.-J. Batht // New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10–12.
2. *Кравченко Г.М.* Расчет здания общежития технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) с применением различных моделей основания [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Д.И. Назаренко, Э.Р. Шарипов // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3. — URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3228/
3. *Кадомяцев М.И.* К вопросам построения эффективных алгоритмов расчета системы «сооружение-грунт» [Текст] / М.И. Кадомяцев, А.А. Ляпин, С.И. Тимофеев // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 1. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/719/
4. *Кравченко Г.М.* Динамический расчет объекта «Спортивно-оздоровительный комплекс» технопарка РГСУ [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Е.О. Шутенко, К.Н. Хашхожев // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4. — URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3279/
5. *Зотова Е.В.* Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия [Текст] / Е.В. Зотова, Л.Н. Панасюк // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 3. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/

6. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — Т. 42. — № 3. — С. 8–15.
7. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов,

Г.М. Кравченко, А.С. Осадчий, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — Т. 44. — № 2. С. 8–17.

8. Кравченко Г.М. Учет пульсации ветра при расчете зданий с несущими кирпичными стенами [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Научное обозрение. — 2014. — № 11-3. — С. 796–799.

References

1. Batht K.-J. Finite Element Procedures. K.-J. Batht // New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10–12.
2. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Nazarenko D.I., Shari-pov E.R. Raschet zdaniya obshchezhitiya tekhnoparka Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta (RGSU) s primeneniem razlichnykh modeley osnovaniya [Calculation of the building of the hostel of the Technopark of the Rostov State Construction University (RSSU) using different models of the base]. *Inzhenerny Vestnik Dona* [Don Engineering Bulletin]. 2015, I. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3228/
3. Kadomtsev M.I., Lyapin A.A., Timofeev S.I. K voprosam postroeniya effektivnykh algoritmov rascheta sistemy «sooruzhenie-grunt» [On the issues of building effective algorithms for calculating the “structure-soil” system]. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2012, I. 1. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/719/
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Shutenko E.O., Khash-khozhev K.N. Dinamicheskiy raschet ob"ekta «Sportivno-ozdorovitel'nyy kompleks» Tekhnoparka RGSU [Dynamic calculation of the object “Sports and fitness complex” of the RGSU Technopark]. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, I. 4. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3279/
5. Zotova E.V., Panasyuk L.N. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh sistem s bol'shim chislom stepeney svobody na impul'snye vozdeystviya [Numerical modeling of dynamic systems with a large number of degrees of freedom on impulse effects]. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2012, I. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/
6. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Reg- ulirovanie parametrov sobstvennykh kolebaniy prostranstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, V. 42, I. 3, pp. 8–15.
7. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchiy A.S., Tru- fanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoy geometricheskoy formy na vetrovye vozdeystviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Techni- cal science]. 2017, V. 44, I. 2, pp. 8–17.
8. Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Uchet pul'satsii vetra pri raschete zdaniy s nesushchimi kirpichnymi stenami [Ac- counting for the wind ripple in the calculation of buildings with bearing brick walls]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Re- view]. 2014, I. 11-3, pp. 796–799.