

УДК 004.41/42, 519.8, 531/534, 539.2/6, 624.042, 624.044

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Куликов Владимир Григорьевич, к.т.н, доцент кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБСУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва)
e-mail: kulikov-miit@mail.ru

Аннотация. Априори, и возводимые и находящиеся в процессе эксплуатации здания и сооружения на протяжении всех жизненных циклов подвергаются различным внешним и внутренним статическим, динамическим и другим видам воздействий. Особую роль и долю динамических воздействий играют ветровые нагрузки, силовое воздействие которых, их модули, линии воздействий и точки приложений трудно предсказуемы. Тем не менее такие воздействия очевидно вызывают кинематические движения со сложными траекториями отдельных составляющих частей зданий и сооружений, их отдельных конструктивных элементов с разной амплитудой и частотой. В работе разработан алгоритм нахождения кинематических параметров указанных конструктивных элементов, их скоростей и ускорений, которые впоследствии могут быть использованы в цифровых «BIM» моделях зданий и сооружений/ Концептуально, рассматриваемые здания и сооружения виртуально подвергались горизонтальной высотной «расшивке» в процессе исследования множеством отдельных материальных точек соответствующих конструктивных элементов в виде горизонтальных дисков, либо отдельных материальных точек множества конструктивных элементов, выполняющих сложные кинематические траектории в результате внешних воздействий. В алгоритме использованы определения данные Л. Эйлером, такие, - как углы прецессии, углы нутации и углы собственного вращения.

Ключевые слова. Здания и сооружения, кинематические параметры, траектория движения, угловая скорость, угловое ускорение, угол прецессии, угол нутации, угол собственного вращения, цифровая модель

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE KINEMATIC PARAMETERS OF THE REACTANCE OF BUILDINGS AND STRUCTURES FROM DYNAMIC INFLUENCES UDC

Kulikov Vladimir G., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Information Systems, Technologies and Automation in Construction", FSBSU VO "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (Moscow) e-mail: kulikov-miit@mail.ru

Annotation. A priori, both buildings and structures under construction and in operation throughout all life cycles are subjected to various external and internal static, dynamic and other types of impacts. Wind loads play a special role and share of dynamic impacts, the force effect of which, their modules, impact lines and application points are difficult to predict. Nevertheless, such impacts obviously cause kinematic movements with complex trajectories of individual components of buildings and structures, their individual structural elements with different amplitude and frequency. The paper develops an algorithm for finding the kinematic parameters of these structural elements, their speeds and accelerations, which can subsequently be used in digital "BIM" models of buildings. Conceptually, the buildings and structures under consideration were virtually subjected to horizontal high-rise "expansion" during the study by a set of separate material points of the corresponding structural elements in the form of horizontal disks, or separate material points of a set of structural elements performing complex kinematic trajectories as a result of external influences. The algorithm uses definitions given by L. Euler, such as precession angles, nutation angles and angles of proper rotation.

Keywords. Buildings and structures, kinematic parameters, motion trajectory, angular velocity, angular acceleration, precession angle, nutation angle, angle of proper rotation, digital model

Цель работы. Разработать алгоритм определения кинематических параметров, скоростей и ускорений сложных траекторий движений (сферическое движение) отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений, рассматривая их отдельными виртуальными материальными точками соответствующих конструктивов от внешних динамических (многопараметрических) ветровых воздействий.

Введение. Численные и численно-аналитические методы расчетов зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях, а также теория и методы оптимизации конструкций зданий и сооружений являются актуальными парадигмами исследований поведения зданий и сооружений в реальных условиях эксплуатации на протяжении всех их жизненных циклов. Здания и сооружения подвержены различным воздействиям, которые необходимо учитывать в процессе их проектирования. Источники динамических и других воздействий могут быть как внутренними, расположенными внутри сооружения, так и внешними по отношению к зданиям и сооружениям.

Проблемы исследования ветровой нагрузки и расчета зданий и сооружений на ветровые воздействия можно разложить на три следующие подзадачи:

- 1) изучение ветрового режима местности, основанное на использовании результатов метеорологических и климатологических исследований (в работе не рассматривается);
- 2) оценка сил, вызываемых воздействием ветра на сооружение, которые изучаются на основе решений задач теоретической аэродинамики и данных экспериментальных исследований (в работе не рассматривается);
- 3) определение реакции сооружения на ветровую нагрузку, основанное, как правило, на решении задач статики и динамики сооружений (в работе рассматривается).



Рис. 1. Характерные реактивные области и зоны давления ветра на здания и сооружения

В процессе внешних воздействий конструктивные элементы, отдельные части зданий и сооружений, а также и здания сами по себе в целом испытывают сложные (как незначительные по амплитуде и частоте, так и значительные, т.е. заметные) внешние воздействия воздушного давления с различной частотой и амплитудой из-за образующихся и взаимодействующих друг с другом динамических зон избыточного и разреженного давлений воздуха, рис. 1.

Термины и определения присущие воздействиям, изображённым на рис.1 и приводящие к возникновению реактивных сложных, сферических траекторий движений элементов на которые оказываются воздействия:

Амплитуда гармонических колебаний: Максимальное значение величины характеризующей вибрацию при гармонических колебаниях.

Амплитудно-частотная характеристика: Зависимость амплитуды вынужденных колебаний системы от частоты гармонического возбуждения с постоянной амплитудой.

Биения: Колебания, которые являются результатом сложения двух гармонических колебаний с близкими частотами.

Вынужденные колебания: Колебания системы, вызванные и поддерживаемые силовым (и/или кинематическим) возбуждением.

Гармонические колебания: Колебания, при которых значения колеблющейся величины, характеризующей вибрацию изменяются во времени по гармоническому закону.

Затухающие колебания: Колебания с уменьшающимися значениями размаха.

Импульсные нагрузки: Динамические нагрузки, время действия которых не более чем в 2-2.5 раза превышает периоды собственных колебаний.

Сферическое движение: Сферическим будем называть движение твердого тела (или материальной точки), при котором одна из его точек в течение всего времени движения остаётся неподвижной. Будем считать, что при сферическом движении твердого тела в каждый момент движения существует прямая, жестко связанная с телом (мгновенная ось вращения), скорость которой равна нулю.

Причём, с точки зрения ранее высказанных положений о невозможности точного определения направлений и модулей сил динамических воздушных воздействий поступим следующим образом. Введем в рассмотрение декартову систему координат и «привяжем» её к рассматриваемой отдельно взятой точке соответствующего конструктивного элемента здания, или к зданию в целом. Кроме этого, как углы изменяющегося внешнего ветрового напора для определения кинематических параметров реагирующих на внешние воздействия отдельных элементов зданий и сооружений или их материальных точек, - введем такие понятия как: 1) угол прецессии, 2) угол нутации и 3) угол собственного вращения, показанные на рис. 2.

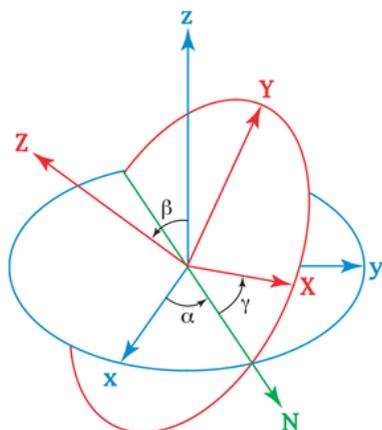


Рис. 2. Угол прецессии, угол (α) между осью «x» и линией узлов; Угол нутации, угол (β) между осями «z» и «Z» (рис.2); Угол собственного вращения, угол (γ) между линией узлов и осью «X»

Постановка задачи. Скорость любой такой точки исследуемого тела при сферическом движении, как векторную величину, будем вычислять, как вращательную скорость \vec{u} вокруг мгновенной оси вращения:

$$\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (1)$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость тела; \vec{r} радиус вектор соответствующей точки, проведенный из неподвижной точки, жестко связанной с исследуемым телом.

Сферическое движение может быть получено, как результат сложения вращений вокруг пересекающихся осей «x, y, z» (рис. 2). В этом случае угловую скорость можно определять, как:

$$\vec{u} = \sum_{k=1}^n \vec{\omega}_k \quad (2)$$

где $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2, \dots, \vec{\omega}_k$ угловые скорости составляющих вращений

Ускорение любой точки твердого тела при сферическом движении получим как геометрическую сумму вращательного и осе-стремительного ускорений

$$\vec{a} = \vec{a}^{\text{вп}} + \vec{a}^{\text{ос}} \quad (3)$$

$$\vec{a}^{\text{вп}} = \vec{\varepsilon} \times \vec{r} \quad (4)$$

где $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение

$$\vec{a}^{\text{ос}} = \vec{\omega} \times \vec{u} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (5)$$

Для этого представим движение здания и движение отдельных его точек прямым круговым конусом с высотой h , и углом 2α при вершине, который катится без скольжения по горизонтальной неподвижной плоскости, рис. 3а. Ось симметрии виртуального конуса вращается равномерно вокруг вертикальной оси с угловой скоростью $\vec{\omega}_1$. Граф траектории движения отдельно взятой материальной точки конструктива, показанного на рис.3а покажем на рис.3б. Элементы представлений внешних воздействий и реакций на них применим к зданию в целом, рис. 3в. Совокупные предыдущие

воздействия на основе с учётом определений Л. Эйлера, как сферическое движений совокупности материальных точек покажем на рис. 3г.

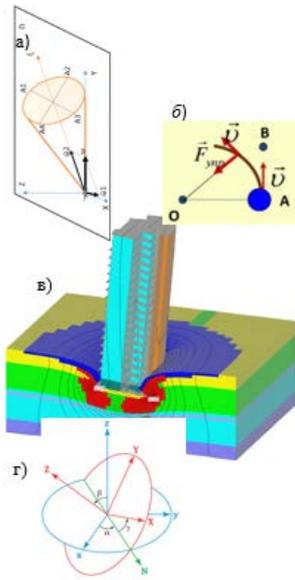


Рис. 3. Постановка задачи, кинематическая схема для определения кинематических параметров конструктивов, подвергнутых стохастическим внешним воздействиям

Результаты. Определим траектории движения указанных точек и элементов (помеченных на рис. 3 условными символами ★), а также определим силовые направления, модули и характеристики динамических воздействий, показанных на рис. 4

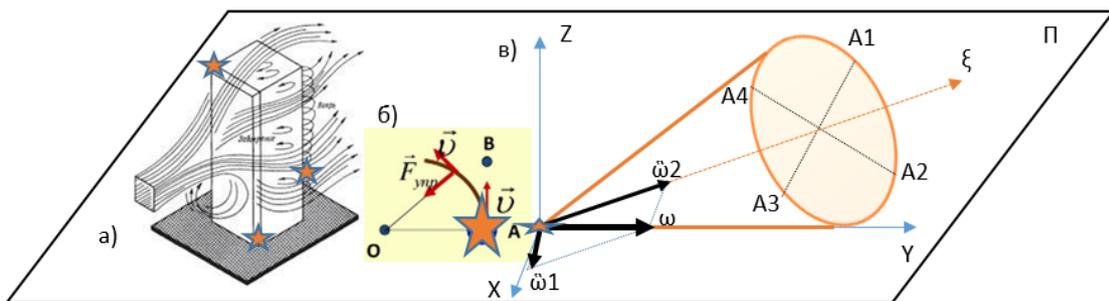


Рис. 4. а) Реактивные области и зоны давления ветра и предполагаемые места исследуемых точек ★; б) граф проекции сферического движения исследуемых точек ★ на соответствующие плоскости системы координат (x,y,z,Рис.2); в) Представление траекторий движения точек A_1, A_2, A_3 и A_4 диаметрально расположенных в основании конуса с образующей под углом (α)

Определим модули и скоростей и ускорений точек A_1, A_2, A_3, A_4 расположенных на концах взаимно перпендикулярных диаметров в основании виртуального конуса так, что отрезок $A_1 A_3$ горизонтален.

Пусть конус совершает сферическое движение, при котором вершина O конуса остается неподвижной. Мгновенная ось вращения совпадает с образующей конуса, касающейся неподвижной плоскости. Выберем систему координат так, чтобы ось Oy совпадала с мгновенной осью вращения. Представим векторы угловой скорости переносного, вокруг оси Oz и относительного, вокруг оси Ox вращений $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$.

Алгоритм. Инструкция 1. Определим угловую скорость конуса, как сумму угловых скоростей соответствующих вращений:

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2 \rightarrow \begin{cases} \vec{\omega}_x = \vec{\omega}_{1x} + \vec{\omega}_{2x} \\ \vec{\omega}_y = \vec{\omega}_{1y} + \vec{\omega}_{2y} \\ \vec{\omega}_z = \vec{\omega}_{1z} + \vec{\omega}_{2z} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Если } \vec{\omega} = \{0, \omega, 0\} \quad \vec{\omega}_1 = \{0, 0, -\omega_1\} \quad \vec{\omega}_2 = \{0, \omega_2 \cos \alpha, \omega_2 \sin \alpha\}$$

$$\text{То } \vec{\omega} = \{0, \omega_1 \operatorname{ctg} \alpha, 0\} \quad (7)$$

Угловую скорость $\vec{\omega}$ можно определить используя рис.1, используя геометрические приведенные построения.

Инструкция 2. Определим угловое ускорение конуса $\vec{\varepsilon} = \dot{\vec{\omega}}$, как скорость конца вектора $\vec{\omega}$, поворачивающегося вокруг вертикальной оси с угловой скоростью $\vec{\omega}_1$, применив формулу Л. Эйлера:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{\omega}_1 \times \vec{\omega} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & -\omega_1 \\ 0 & \omega_1 \operatorname{ctg} \alpha & 0 \end{bmatrix} = \{\omega_1^2 \operatorname{ctg} \alpha, 0, 0\} \quad (8)$$

Инструкция 3. Скорости точек A_i определим, используя соотношение Л. Эйлера:

$$\vec{v}_{A_i} = \vec{\omega} \times \vec{r}_i = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \omega_1 \operatorname{ctg} \alpha & 0 \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

где $\vec{r}_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ радиус-вектор точки A_i

$$\vec{r}_1 = \{h \cdot \operatorname{tg} \alpha, h \cdot \cos \alpha, h \cdot \operatorname{tg} \alpha\} \quad \vec{r}_2 = \left\{0, \frac{\cos 2\alpha}{\cos \alpha} \cdot h, 2h \cdot \sin \alpha\right\} \quad (10)$$

$$\vec{r}_3 = \{-h \cdot \operatorname{tg} \alpha, h \cdot \cos \alpha, h \cdot \sin \alpha\} \quad \vec{r}_4 = \left\{0, \frac{h}{\cos \alpha}, 0\right\}$$

Тогда

$$\overline{v_{A1}} = \{h\omega_1 \cdot \cos\alpha, 0, -h\omega_1\} \quad \overline{v_{A2}} = \{2h\omega_1 \cdot \cos\alpha, 0, 0\} \quad (11)$$

$$\overline{v_{A3}} = \{h\omega_1 \cdot \cos\alpha, 0, h\omega_1\} \quad \overline{v_{A4}} = \{0, 0, 0\}$$

Инструкция 4. Ускорение точки A_i найдём, как сумму осе-стремительного $\overline{a_{Ai}^{oc}}$ и вращательного $\overline{a_{Ai}^{bp}}$ ускорений следующим образом:

$$\overline{a_{Ai}} = \overline{a_{Ai}^{oc}} + \overline{a_{Ai}^{bp}} \quad (12)$$

$$\overline{a_{Ai}^{oc}} = \overline{\omega} \times \overline{v_{Ai}} = \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 0 & \omega_1 \cdot ctg\alpha & 0 \\ v_{Ax} & v_{Ay} & v_{Az} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\overline{a_{Ai}^{bp}} = \overline{\varepsilon} \times \overline{v_{Ai}} = \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_1^2 \cdot ctg\alpha & 0 & 0 \\ v_{Ax} & v_{Ay} & v_{Az} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Откуда

$$\overline{a_{A1}} = \{-h\omega_1^2 \cdot ctg\alpha, -h\omega_1^2 \cdot \cos\alpha, 0\} \quad \overline{a_{A2}} = \left\{0, -2h\omega_1^2 \cdot \cos\alpha, \frac{-h\omega_1^2}{\sin\alpha}\right\}$$

(15)

$$\overline{a_{A3}} = \{h\omega_1^2 \cdot ctg\alpha, -h\omega_1^2 \cdot \cos\alpha, 0\} \quad \overline{a_{A4}} = \{0, 0, 0\}$$

Выводы.

- 1) Рассмотрены варианты образований зон избыточных (со своим знаком) давлений на здания и сооружения, приводящие к возможности возникновения сферических форм реактивных траекторий движений элементов конструкций;
- 2) Приведены факторы весьма вероятно приводящие к возникновению реактивного сферического движения элементов конструкций или здания в целом;
- 3) Разработана расчётная схема для определения сложных траекторий движений конструктивных элементов зданий и сооружений;
- 4) Разработан алгоритм определения кинематических параметров сферических форм реактивных движений конструктивных элементов зданий и сооружений.

- 5) Обосновано проявления эффектов сферического движения от ветрового напора не только на конструктивные элементы, но и на основания зданий и сооружений.

Литература

1. Бабенко, М. А. Введение в теорию алгоритмов и структур данных. / М.А. Бабенко, М.В. Левин. - М.: МЦНМО, 2014. - 144 с.
2. Верещагин, Н. К. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 3. Вычислимые функции / Н.К. Верещагин, А. Шень. - Москва: СИНТЕГ, 2002. - 192 с.
3. Вирт, Н. Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт. - М.: [не указано], 1989. - 760 с.
4. Вирт, Н. Алгоритмы+структуры данных=программы / Н. Вирт. - М.: [не указано], 1992. - 539 с.
5. Гилл, А. Введение в теорию конечных автоматов / А. Гилл. - М.: [не указано], 2005. - 985 с.
6. Александров А.В., Лащеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы: Учебник для вузов / Под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1983. – 488 с
7. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М.: «Высшая школа», 2004. - 380 с.
8. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 2000. – 560 с.
9. Бате Л., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
10. Безделев В.В., Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя.– Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. тех. ун-та, 2000 г. – 120 с., ил.
11. Безухов Н. И., Лужин О. В., Колкунов Н. В. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах. М., 1987. -264 с.
12. Белый В. Д. Стержни и стержневые системы: учеб. пособие. – Омск: ОмПИ, 1979. – 92 с.
13. Белый В.Д. Напряжение и деформации в стержнях и стержневых системах: учеб. пособие. – Омск: ОмПИ, 1986. – 102 с.
14. Белый В.Д. Пластины и оболочки: учеб. пособие. – Омск: ОмПИ, 1985. – 87 с.
15. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках / Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. – 494 с.