

БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ

УДК 624.012: 699.841

УТОЧНЕННАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ПОДВЕСНОГО ЗДАНИЯ

УТОЧНЕНА РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ПІДВІСНОЇ БУДІВЛІ

DESIGN SCHEME OF SUSPENSION BUILDING

Азизов Т.Н., д.т.н., проф. (Уманский государственный педагогический университет)

Азізов Т.Н., д.т.н., проф. (Уманський державний педагогічний університет)

Azizov T.N., Doctor of Engineering, Profesor (Uman State Pedagogical University)

Представлена уточненная методика расчета динамических усилий в подвесном сейсмически безопасном здании. Методика основана на составлении и решении уравнений Лагранжа второго рода. Приведена количественная оценка степени уменьшения динамических усилий в предлагаемом здании по сравнению с традиционным зданием, работающим по консольной схеме.

Наведена уточнена методика розрахунку динамічних зусиль в підвісній сейсмічно безпечній будівлі. Методика ґрунтується на складанні і рішенні рівнянь Лагранжа другого роду. Наведена кількісна оцінка ступеня зменшення динамічних зусиль в запропонованій будівлі в порівняння із будівлею, яка працює за консольною схемою.

The article is about the construction of seismically safe suspension-type buildings and constructions introduced by the author. It says that the earthquake forces in the load-bearing structures of such a system are several times weaker than those in traditional buildings and constructions, the columns of which are embedded in foundations. Such a constructive system is shown not to require the installation of expensive devices such as dampers, shock absorbers, etc. that reduce seismic forces. The data of dynamic calculations of the simplified scheme are given in the article and indicate the essential advantage of the suggested construction in comparison with others. The article says that to calculate preliminary, the dynamic oscillation mass schemes which are suspended on an elastic frame are used. As a result of the set-up and solution of Lagrange's equations of the second kind, equations of motion of a simplified scheme are obtained. After solving the equations, the forces existing on the supporting construction of the suggested system are

obtained. Such preliminary calculations should be carried out in order to determine the initial data on the structure of the bearing frame, the length of the cables on which the building or construction is suspended, and the selection of the stiffness characteristics of bearing elements. It is shown that after preliminary calculations and taking the preliminary dimensions of the cross-sections of the elements on the basis of the solution of the dynamic problem the final calculation can be carried out using well-known programmes “Ansys”, “Nastran”, etc.

Анализ исследований и постановка задачи. Известно, что основной и наиболее опасной составляющей землетрясения является горизонтальная составляющая. В динамических расчетах массы этажей сосредотачиваются в уровне перекрытий [5]. Горизонтальные сейсмические силы от каждого этажа, как известно, равны произведению массы на ускорение колебания грунта. При этом, чем большее количество этажей имеет здание, тем большие усилия будут возникать в уровне обреза фундамента.

Существующие системы сейсмической изоляции зданий, как правило, выполняются с применением демпфирующих устройств, выключающихся связей и др. [3, 6, 7]. Имеются здания, в которых в качестве динамического гасителя колебаний подвешиваются массивные маятники с системой пружин (как, например, в здании Taipei 101 в Китае). При этом, однако, динамические усилия все равно остаются достаточно высокими. Кроме того, механизмы такой сейсмической защиты обходятся достаточно дорого.

Предварительные исследования показывают, что более эффективным является подвешивание самого здания, предложенного автором настоящей статьи. При этом сейсмически усилия существенно снижаются. В связи с необычным решением подвесного здания его конструктивные особенности, а также подход к расчету прочности и деформативности подлежат тщательному изучению и обоснованию. Преимущества такой конструкции очевидны, однако методика расчета динамических усилий требует совершенствования.

В связи с вышесказанным **целью настоящей статьи** является совершенствование динамической расчетной схемы подвесного здания для уточнения расчетных динамических усилий.

Изложение основного материала. Предложенное автором здание представляет собой конструкцию, когда все здание подвешено на несущей раме, масса которого во много раз меньше массы самого здания. Предварительные расчеты производятся методами теоретической механики с использованием уравнений Лагранжа второго рода [2, 4, 8]. При этом рассматривается одномассовая схема (когда все здание рассматривается как единое целое) и многомассовая система (каждый этаж имеет свою массу). Рассматриваются различные схемы предварительного расчета: маятник с колеблющейся точкой подвеса; одна масса или несколько масс, подвешенные на раме, основание которой подвергается кинематическим возмущениям [2].

Схема подвесного здания по [1, 2] представлена на рис. 1 в двух вариантах: опирание на пирамидальную раму (рис. 1, а); опирание на прямоугольную в плане раму (рис. 1, б). В обоих случаях само здание шарнирно подвешено на тросах к несущей раме.

В качестве предохранителей (поз. 4 на рис. 1, а и поз. 6 на рис. 1.б), которые обрываются во время землетрясения, может быть использован простой арматурный стержень [2].

Преимущества конструктивной схемы подвешенного здания по сравнению с традиционной консольной схемой с точки зрения сейсмической безопасности можно видеть из рис. 2, где приведены динамические расчетные схемы сравниваемых зданий.

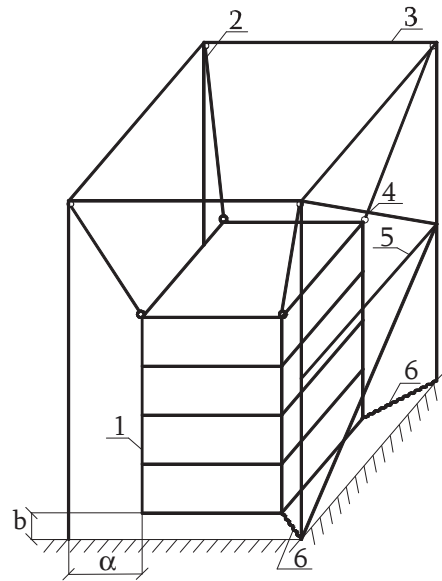
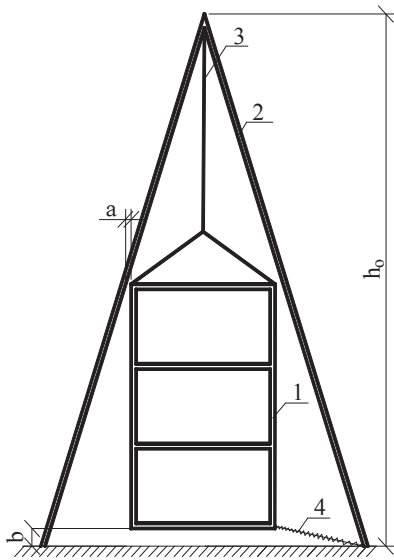


Рис. 1,а. подвесное здание при опирании на пирамидальную раму: 1 – здание; 2- опорная рама; 3 – несущие тросы; 4- предохранитель

Рис. 1,б. Схема подвески здания на прямоугольную в плане раму: 1 – здание; 2 – несущие тросы 3- опорная рама; 4-раскосы; 5-распорки; 6- предохранители

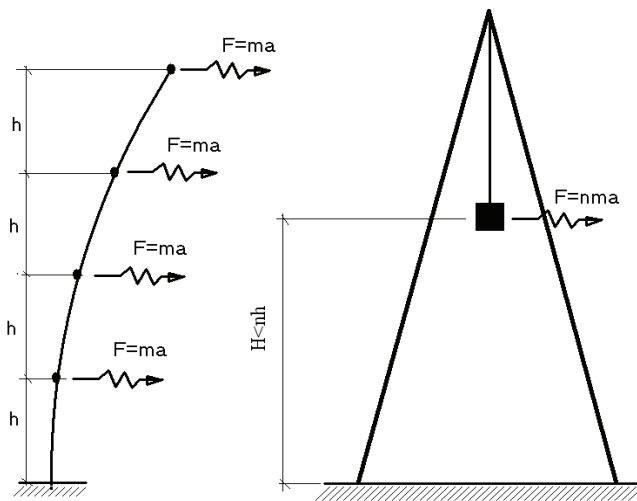


Рис. 2. Динамические расчетные схемы здания: а) – традиционного консольного; б) – предлагаемого подвесного

В традиционном здании при наличии внешнего горизонтального ускорения в уровне перекрытия каждого этажа будут действовать динамические силы $F = m \cdot a$, где m – масса одного этажа; a – ускорение колебания грунта от землетрясения. В уровне обреза фундамента суммарный изгибающий момент в условной консольной схеме традиционного многоэтажного здания будет складываться из моментов от силы в уровне каждого этажа. В рассматриваемом же подвесном здании динамическую схему приближенно можно представить (см. рис. 2, б) как одна масса величиной $M = n \cdot m$. И горизонтальная реакция на несущую раму будет меньше реакции по консольной схеме.

В [2] рассмотрен принцип предварительного динамического расчета, целью которого является определение уравнений движения системы и порядка сейсмических сил, действующих на несущую раму. Если все подвесное здание (или сооружение) рассматривать в первом приближении как сосредоточенную массу, подвешенную на раму, то расчетную динамическую схему можно представить в виде маятника с подвижной точкой подвеса. Эта точка подвеса совершает колебания около нулевой точки, которые возникают в результате колебаний грунта при землетрясении. В [8] имеется решение задачи об определении относительного движения такого маятника с использованием дифференциальных уравнений относительного движения. В работе автора [2] представлена более точная расчетная схема, в которой отмечено, что кроме горизонтальных колебаний точки подвеса как жесткого целого следует учитывать деформацию несущей рамы. В таком случае динамическая расчетная схема будет выглядеть, как показано на рис. 3. При этом в расчетной схеме фигурируют масса m_1 консоли (рамы) и масса m_2 маятника (здания).

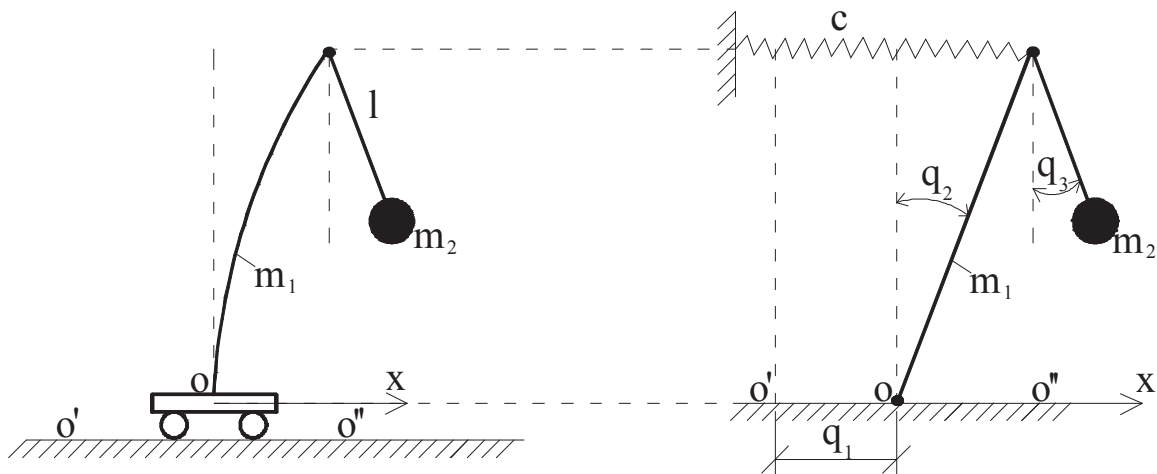


Рис. 3. Динамическая расчетная схема консольно-подвесной системы:
а) – реальная схема; б) – упрощенная схема

Для упрощения расчетной схемы в [2] предлагается заменить реальную схему по рис. 3, а на упрощенную по рис. 3, б, где защемленная в основании

консоль заменяется жестким стержнем, шарнирно закрепленным в основании и пружиной жесткости C в вершине.

Жесткость пружины C подбирается из условия равенства статического прогиба конца консоли от единичной горизонтальной силы перемещению пружины от той же силы. Основание системы (точка O на рис. 3) колеблется по горизонтали влево и вправо с амплитудой $O-O^1$.

Расчет такой схемы так же можно производить с использованием уравнений Лагранжа второго рода. При этом система будет содержать три обобщенные координаты: горизонтальное перемещение основания q_1 , угол поворота стойки q_2 и угол поворота нити q_3 (рис. 3, б). Составляя уравнения Лагранжа второго рода, приходим к системе трех дифференциальных уравнений второго порядка. Начальные условия задачи вытекают из заданных колебаний грунта при сейсмическом воздействии. Углы поворота и угловые скорости стойки и нити в начальный момент равны нулю, т.е.:

$$q_2(0) = 0; \dot{q}_2 = 0; q_3(0) = 0; \dot{q}_3 = 0; \quad (1)$$

т.е. перемещение точки O основания в начальный момент равно нулю, ускорение в начальный момент задано условиями сейсмических данных.

Наиболее соответствующей истинной схеме работы, но упрощенной схемой является схема, приведенная на рис. 4.

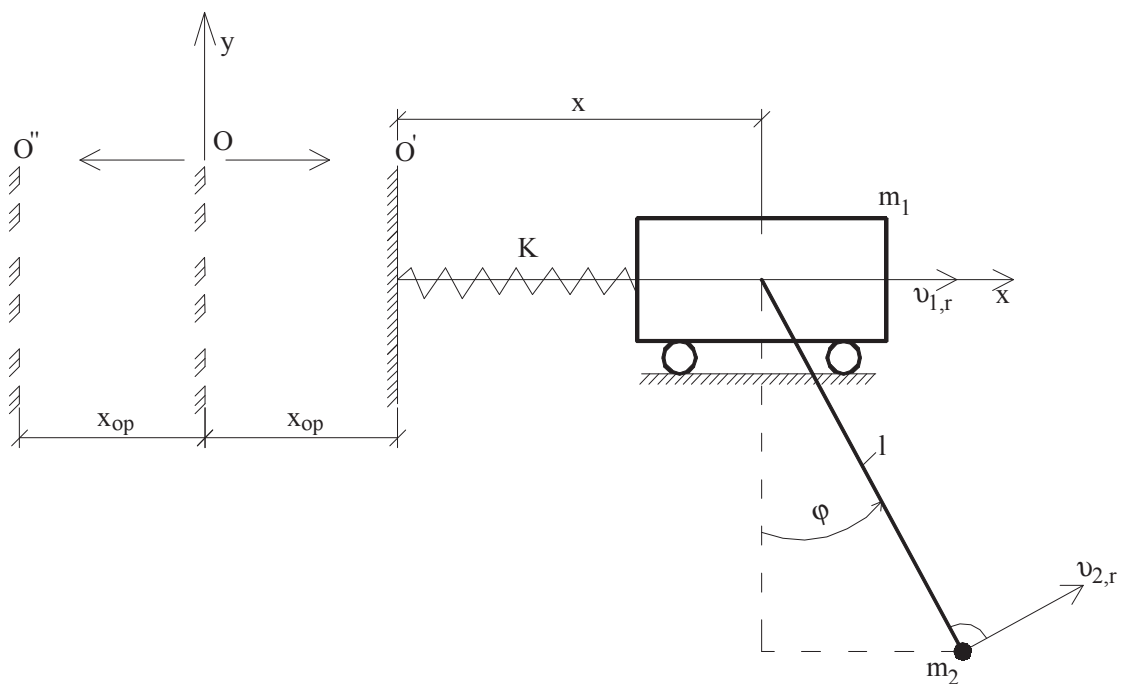


Рис. 4. Расчетная схема с колеблющейся опорой

Условная тележка крепится к опоре с помощью пружины жесткостью k . Жесткость пружины моделирует перемещение конца рамы по горизонтали. Масса условной тележки m_1 моделирует массу несущей рамы, на которую подвешено здание; масса m_2 – моделирует массу самого здания. Приведение консольной схемы к схеме тележки с пружиной показано на рис. 5.

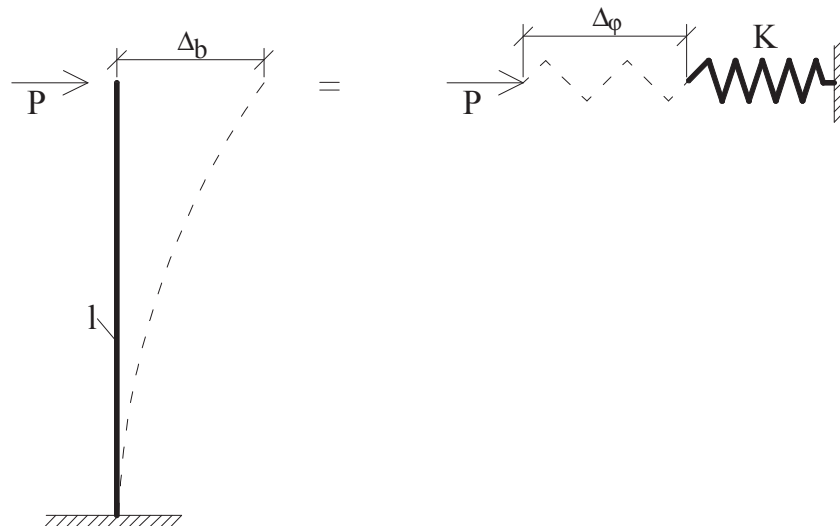


Рис. 5. Схема к определению жесткости условной пружины

Перемещения конца консоли (точки подвеса) от действия силы P равно: $\Delta_b = Pl^3 / 3EJ$. Перемещения пружины от действия силы P равно: $\Delta_s = P/k$. Зная изгибную жесткость консоли EJ , приравняв величины Δ_b и Δ_s , получим искомую величину эквивалентной жесткости пружины. При этом конструкция несущей рамы может быть как пирамидальной, так и прямоугольной в плане. От этого принцип определения жесткости K не изменяется.

Опора, расположенная в начале координат системы OXY и моделирующая колебания земной поверхности, совершает колебания между точками O^I и O^{II} относительно положения равновесия O по закону $x_{op} = a \cdot \sin(p \cdot t)$, где a – амплитуда колебаний, p – частота. Амплитуду и частоту колебаний можно определить по сейсмограммам соответствующей сейсмической зоны, где происходит строительство.

За обобщенные координаты (неизвестные) примем величину $x=x(t)$, равную расстоянию от центра тележки до опоры и угол поворота $\varphi=\varphi(t)$. Эти неизвестные можно определить из решения системы уравнений Лагранжа второго рода. Уравнения Лагранжа, как известно из курса теоретической механики, в таком случае будут иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где L – функция Лагранжа, равная разности кинетической и потенциальной энергии системы, определяемая известным методом теоретической механики [4,8].

Определив кинетическую и потенциальную энергию системы, произведя необходимое дифференцирование и сокращения, окончательно получим систему уравнений Лагранжа второго рода относительно неизвестных $x=x(t)$ и $\varphi=\varphi(t)$:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - (m_1 + m_2)p^2 a \sin pt + kx = 0 \\ \ddot{x} \cos \varphi + l \ddot{\varphi} - ap^2 \sin pt \cos \varphi + g \sin \varphi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; остальные обозначения – по рис. 4. Точка или две точки над символом в выражениях (2) и (3) обозначают соответственно первую и вторую производные по времени t .

Система дифференциальных уравнений Лагранжа достаточно просто решается как численно, так и аналитически. Решение этой системы даст нам закон движения системы. Зная закон движения, достаточно просто получить силы, действующие на элементы системы, в том числе на пружину, что в нашем случае является горизонтальной составляющей на опорную раму.

Рассмотрим для примера расчет по схеме рис. 4 на основании решения системы уравнений (3) для схемы подвесного здания со следующими исходными данными: длина нити подвеса $l=5$ м; масса тележки (несущей рамы) $m_1=22$ Т; масса здания $m_2=806$ Т; коэффициент жесткости условной пружины (жесткость несущей рамы в горизонтальном направлении) $K=6500000$ Н/м; максимальное ускорение колебания грунта $W_{\max}=4.8$ м/с²; максимальная скорость колебания грунта $V_{\max}=0.48$ м/с. Скорость и ускорение взяты как максимальные значения для землетрясения силой в 9 баллов по шкале Рихтера. На рис. 6. Приведен график изменения величины $x=x(t)$ за первые пять секунд колебаний. На рис. 7 приведен график изменения угла поворота нити подвеса $\varphi=\varphi(t)$ за тот же промежуток времени.

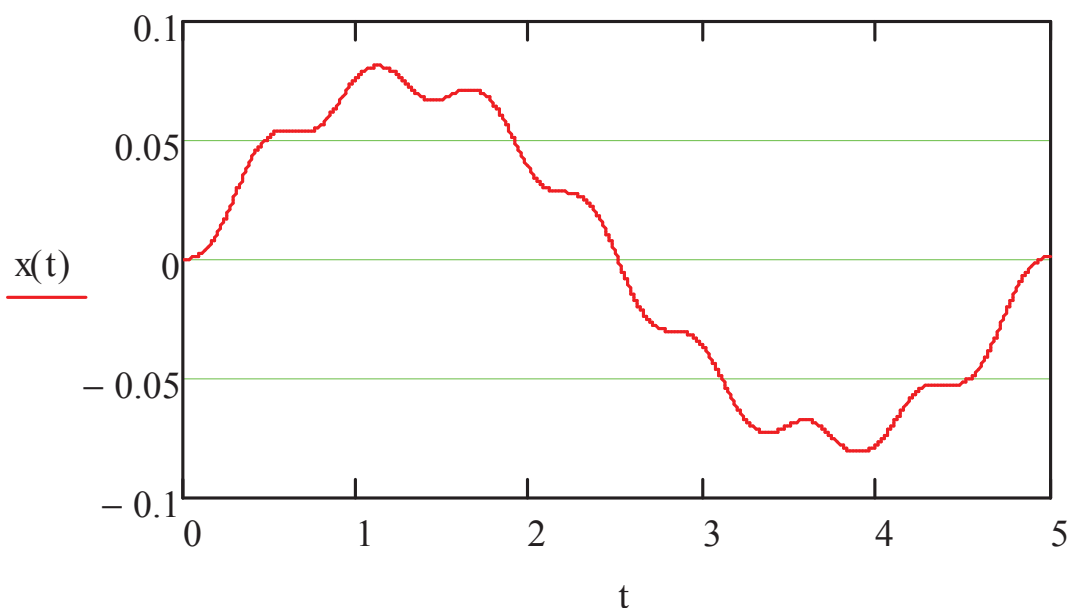


Рис. 6. График изменения $x=x(t)$ перемещения точки подвеса рамы

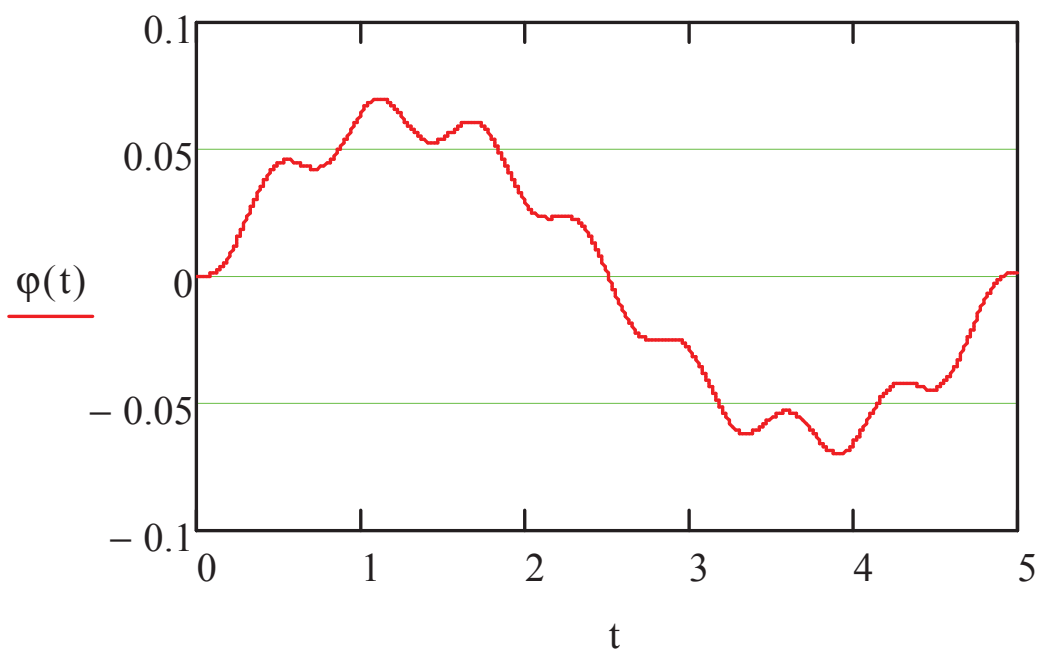


Рис. 7. График изменения угла поворота $\varphi=\varphi(t)$ нити подвеса во времени

Из рисунка 7 видно, что угол поворота имеет достаточно малые значения, т.е. даже при сильном землетрясении отклонение здания от вертикали не превышает 4 градусов. При этом горизонтальное усилие оказывается достаточно малым.

Рассмотрим величину этого усилия. Учитывая, что горизонтальная составляющая динамической силы, действующей на точку подвеса (несущую раму), равна $F_x=X_{\max} * K$, получим:

$$F_x=X_{\max} * K \approx 0.081 * 6500000 \approx 530 \text{ кН.}$$

Горизонтальное усилие в традиционном здании:

$$F_{xt}=m_2 * W_{\max} = 806000 * 4.8 \approx 3868 \text{ кН.}$$

Отношение горизонтальных усилий в консольном и подвесном вариантах составит $F_{xt}/F_x=3868/530=7.29$ (730% !!!).

Как видим, разница в усилиях весьма и весьма существенная, что говорит в пользу практического применения предлагаемого подвесного здания.

Динамические силы на несущую раму, как видно из приведенного примера, значительно меньше, чем в случае, когда колонны каркаса здания являются защемленными в фундаменте. Кроме этого изменением соотношения массы рамы и массы здания, а также изменением длины нити подвески можно регулировать частоту собственных колебаний такого здания для исключения резонансных явлений при землетрясении.

После определения предварительных сечений конструкции несущей рамы (в результате предварительного динамического расчета по законам теоретической и строительной механики) и самого подвесного здания окончательный сейсмический расчет можно производить с использованием известных программных комплексов типа «Ansys», «Lira», «Nastran» и др.

Расчеты показывают, что горизонтальная составляющая динамического

усилия на несущую раму подвесного здания в разы меньше аналогичной силы для традиционного консольного здания (см. пример выше). Кроме того, в отличие от систем защиты с выключающимися связями, предлагаемая система после землетрясения не требует замены каких-либо конструкций.

В виду того, что вертикальные несущие элементы каркаса самого здания работают на растяжение, их материал может быть использован в полной мере в результате отсутствия продольного изгиба колонн. При действии ветровых нагрузок динамические усилия в элементах предлагаемого здания будут также значительно меньшими. Таким образом, реализация предлагаемого подвесного здания с одной стороны существенно повышает его сейсмическую безопасность, с другой стороны не удорожает строительство.

Выводы и перспективы исследований. Преимуществом ранее предложенного автором подвесного здания является факт существенного уменьшения сейсмических сил. В статье уточнена методика динамического расчета системы с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Показано, что динамические усилия в подвесном здании в 7 раз меньше усилий в здании, работающем по консольной схеме, что говорит в пользу.

В перспективе предполагается совершенствование предложенного способа определения динамических реакций путем рассмотрения пространственной схемы, где следует учесть усилия по направлению всех трех осей координат.

1. Азізов Т.Н. Конструкція сейсмічно стійкої будівлі / Патент на корисну модель №54247. Україна. Бюлл. №20. 25.10.2010.

2. Азізов Т.Н. Расчет динамических усилий в элементах подвесного здания / Т.Н. Азізов // Sciences of Europe. – 2016. – Vol 4, № 9. – S. 69-73.

3. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. – М.: Стройиздат, 1976. – 229 с.

4. Савин Г.Н. Теоретическая механика / Г.Н. Савин, Н.А. Кильчевский, Т.В. Путята. – Киев: Гостехиздат, 1963. – 610 с.

5. Смирнов А.Ф. и др. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.

6. Смирнов В.И. Применение сейсмоизоляции зданий и исторических сооружений в России / В.И. Смирнов, Я.М. Айзенберг // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 60. - К.: НДІБК, 2004. – С. 210-217.

7. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция зданий и сооружений / Промышленное и гражданское строительство, 1997, № 12. – С. 37-39.

8. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть II. Динамика. / А.А. Яблонский. – М.: Высшая школа, 1966. – 411 с.