

**ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ  
РЕСУРСЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

УДК 624.012: 699.841

**КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПОДВЕСНОГО СООРУЖЕНИЯ**

**КОНСТРУКЦІЯ ТА РОЗРАХУНОК НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ПІДВІСНОЇ СПОРУДИ**

**DESIGN AND CALCULATION OF BEARING ELEMENTS OUTBOARD  
FACILITIES**

**Азизов Т.Н., д.т.н., проф., Ковров А.В., к.т.н., проф.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

**Азізов Т.Н., д.т.н., проф.** (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

**Azizov T.N., Doctor of Engineering, Profesor, Kovrov A.V. Professor** (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

Предложена методика определения уравнений движения и реакций на несущую раму подвешенного здания. Методика основана на составлении и решении уравнений Лагранжа второго рода. Приведено совершенствование схемы несущей рамы, позволяющей уменьшить занимаемую ею площадь. Показаны преимущества подвешенного здания по сравнению с традиционным.

Запропонована методика визначення рівнянь руху та реакцій на несучу раму підвісної будівлі. Методика ґрунтується на складанні і рішенні рівнянь Лагранжа другого роду. Наведено вдосконалення схеми несучої рами, яка дозволяє зменшити площу забудови. Показані переваги підвісної будівлі в порівнянні з традиційним.

The method of determining the equations of motion and reactions to the base frame of the building suspended. The technique is based on the formulation and solution of Lagrange equations of the second kind. Powered by improving the circuitry of the base frame, which allows to reduce the area occupied by it. The advantages of the suspension of the building compared to the traditional.

**Постановка проблемы и задачи исследований.** Известно, что в расчетах зданий и сооружений массы этажей сосредотачиваются в уровне перекрытий [5]. Горизонтальные сейсмические силы от каждого этажа равны произведению массы на ускорение колебания грунта. При этом, чем большее количество этажей имеет сооружение, тем большие усилия будут возникать в уровне обреза фундамента.

Сейсмическая изоляция зданий, как правило, выполняется с применением демпфирующих устройств или выключающихся связей [6]. Как известно, основная идея систем с выключающимися связями состоит в том [6, 7], что выключающийся элемент прикрепляется жестко к связевому элементу и к основной несущей конструкции, обеспечивая жесткую связь вышележащих этажей и фундамента до определенных пороговых величин сейсмической нагрузки. После превышения этих пороговых величин выключающийся элемент разрушается. Недостатком такой защиты является необходимость замены выключающихся элементов после землетрясения. Кроме того, величина таких пороговых значений весьма сложно поддается расчету. Сейсмические усилия снижаются, но остаются при этом достаточно большими.

В [1] предложена конструкция подвешенного здания, отличающегося высокой сейсмической безопасностью. Эта конструктивная схема является новой и требует разработки методов расчета ее элементов. Однако предложенная там несущая конструкция в виде треугольной рамы занимает много места в плане здания. Кроме того в [1] отсутствуют принципы расчета такой конструкции.

В связи с этим **целью настоящей статьи** является совершенствование конструкции несущей рамы подвешенного здания и разработка принципов предварительного расчета несущих конструкций.

#### **Изложение основного материала.**

Схема подвешенного здания по [1] представлена на рис. 1. Конструкция состоит из несущей рамы 2, на которой подвешен каркас здания 1 на тросе 3. Недостатком такой конструкции является факт, что несущая рама занимает большую площадь. Принцип создания более рациональной несущей рамы будет описан ниже. Сначала рассмотрим принцип предварительного динамического расчета, целью которого является определение уравнений движения системы и порядка сейсмических сил, действующих на несущую раму, что позволит принять предварительные размеры и материалы.

Если сооружение или каркас здания рассматривать (как в [1]) как сосредоточенную массу, подвешенную на раму, то расчетную динамическую схему можно представить в виде эллиптического маятника, в котором ползун прикреплен к неподвижной стенке пружиной (рис. 2). Здесь  $m1$  и  $m2$  – соответственно масса ползуна и шарика,  $C$  – жесткость пружины (Н/м). Ползун без трения может двигаться в горизонтальном направлении. Нить подвеса длиной  $l$  является невесомой и нерастяжимой. Ползун с пружиной в

нашем случае имитирует работу несущей рамы. Жесткость  $C$  условной пружины должна подбираться из условия, что при действии единичной горизонтальной силы ее перемещение равно перемещению точки подвеса несущей рамы от той же единичной силы.

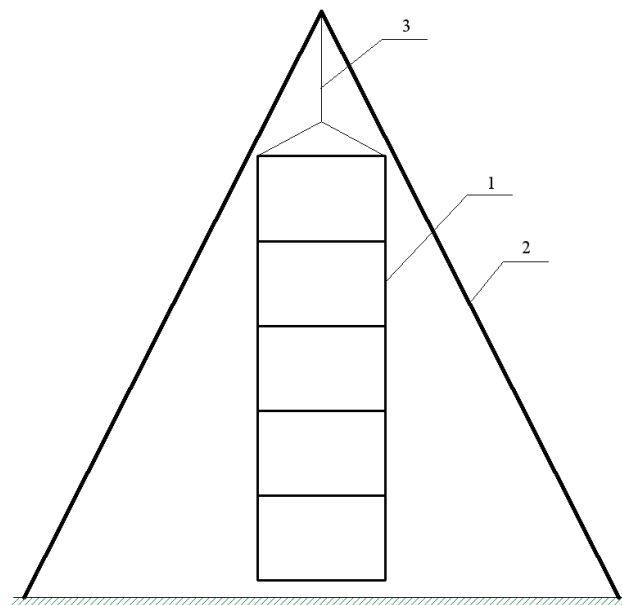


Рис. 1. Конструктивная схема подвесного здания

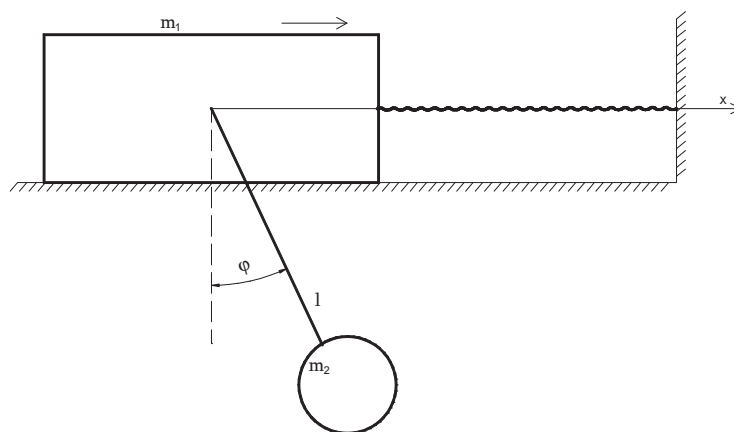


Рис. 2. Динамическая расчетная схема

Расчет эллиптического маятника, схема которого приведена на рис. 2, является достаточно несложной задачей теоретической механики [4]. В [3] имеется решение аналогичной задачи, в которой тележка наезжает на упругий упор, прикрепленный к неподвижной стенке. При этом используется уравнение Лагранжа второго рода. В результате решения получена система дифференциальных уравнений движения системы, являющейся системой с двумя степенями свободы (обобщенными координатами): первая – горизонтальное перемещение  $x$ ; вторая – угол поворота маятника  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos(\varphi) - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi) &= -c \cdot x \\ \ddot{x} \cos(\varphi) + l \cdot \ddot{\varphi} &= -g \cdot \sin(\varphi); \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – соответственно масса ползуна (в нашем случае несущей рамы) и шарика (в нашем случае – сооружения или каркаса здания);  $l$  – длина троса, на котором подвешено сооружение;  $x, \varphi$  – соответственно горизонтальное перемещение и угол поворота (см. рис. 2);  $g$  – ускорение силы тяжести. Точка или две точки над символом в выражении (1) обозначают соответственно первую и вторую производную по времени  $t$ .

Система дифференциальных уравнений (1) достаточно просто решается как численно, так и аналитически. Решение системы дифференциальных уравнений (1) дает нам закон движения системы. Зная закон движения, достаточно просто получить силы, действующие на элементы системы (решить так называемую прямую задачу динамики), в том числе на пружину, что в нашем случае является горизонтальной составляющей на опорную раму.

Решение задачи с одной сосредоточенной массой больше подходит для цельных сооружений (силосы, градирни, бункера и т.п.). В случае многоэтажного здания для более точного определения усилий на раму можно рассмотреть расчетную схему, в которой здание является не одной сосредоточенной массой, а системой масс, сосредоточенных в уровне перекрытия каждого этажа (рис. 3). При этом выражение для потенциальной энергии системы не изменится по сравнению со случаем вывода уравнений (1). В выражение кинетической энергии системы добавятся составляющие от движения каждой из масс. Система уравнений при этом будет содержать столько неизвестных, сколько степеней свободы (обобщенных координат) имеет система.

После определения предварительных сечений конструкции несущей рамы и самого подвесного здания окончательный сейсмический расчет можно производить с использованием известных программных комплексов типа «Лира», «Ansys» и др.

Динамические силы на такую несущую раму будут существенно ниже, чем в случае, когда колонны каркаса здания являются защемленными в фундаменте, что подробно показано в [1].

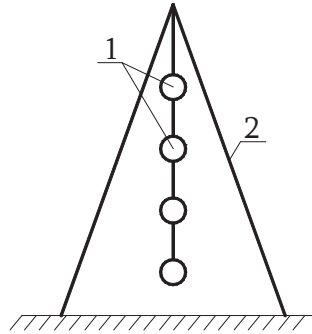


Рис. 3. Динамическая расчетная схема с отдельным рассмотрением каждой массы этажа

Рассмотрим теперь другие разновидности конструкции несущей рамы. Несущая рама по рис. 1, как было сказано выше, занимает большую площадь. Чем выше само подвесное здание или сооружение, тем большую площадь будет занимать несущая рама. Для устранения этого недостатка конструкцию несущей рамы можно принять в виде, показанном на рис. 4.

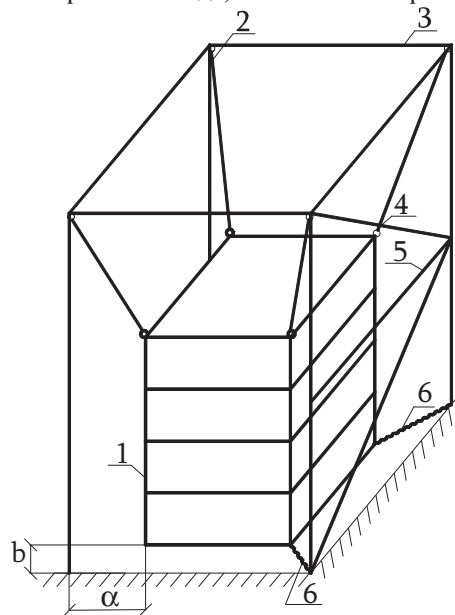


Рис. 4. Схема подвески здания на четырехугольную в плане раму

Здесь несущая рама имеет ту же форму, что и само здание (прямоугольную, круглую и т.п.). При этом зазор  $a$  между колоннами несущей рамы и каркасом здания может быть минимальным и принятым из конструктивных соображений, а также соображений максимальной амплитуды колебаний здания при землетрясении. Для предотвращения колебаний подвешенного здания от ветра в нижней его части предусматривается «предохранитель» (см. [1]), роль которого может играть стальной стержень, обрывающийся при землетрясении (поз. 6 на рис. 4).

Для уменьшения расчетной длины колонн несущей рамы, а также увеличения ее горизонтальной жесткости в ней могут быть предусмотрены раскосы (поз. 4) и распорки (поз.5 на рис. 4).

Устойчивость против землетрясения такой несущей рамы, конечно же, ниже устойчивости рамы, показанной на рис. 1. Однако и в этом случае она будет значительно более сейсмостойкой, чем здание в традиционном исполнении. Это связано с тем, что основная масса всей конструкции сосредоточена в самом здании (колонны, ригеля, перекрытия, наружные и внутренние стены, оборудование и т.п.). Изгибающие моменты и поперечные силы в обресе фундамента колонн несущей рамы будут возникать от динамических сил, зависящих от массы только элементов, составляющих саму раму, и определенной после решения системы (1) горизонтальной составляющей динамической силы от колебания подвешенного здания. Эти силы будут значительно меньшими, чем в случае, когда колонны здания защемлены в фундаменте.

Можно также закрепить подвешенное здание снизу к фундаменту, т.е. вместо выключенных связей (поз. 6 на рис. 4) их следует сделать постоянными. При этом динамическая расчетная схема (рис. 5) для составления уравнений Лагранжа будет содержать дополнительный элемент.

Каждая масса  $m_2...m_n$  (этаж здания), а также масса ползуна  $m_1$  будет участвовать в общей кинетической энергии системы, а в выражение потенциальной энергии системы в отличие от схемы по рис. 2 добавится кроме всего еще и энергия упругой силы  $F_2$  от деформации связи с жесткостью  $C_2$ . Если условно считать, что массы  $m_2...m_n$  соединены шарнирно, то за обобщенные координаты следует принять горизонтальное перемещение ползуна (точки подвеса здания), угол поворота массы  $m_2$  относительно ползуна и углы поворота каждой нижней массы относительно верхней. Тогда при количестве этажей  $k$  число обобщенных координат, а следовательно, число уравнений Лагранжа второго рода будет равно  $k+1$ . Если же учесть также деформации подвесок (несущих тросов), то дополнительно появятся еще  $k$  обобщенных координат вертикальных перемещений каждой массы (этажа) относительно верхней и число уравнений Лагранжа будет уже равно  $2*k+1$ . Кроме того в этом случае в выражение потенциальной энергии системы добавятся составляющие от упругой деформации каждой подвески.

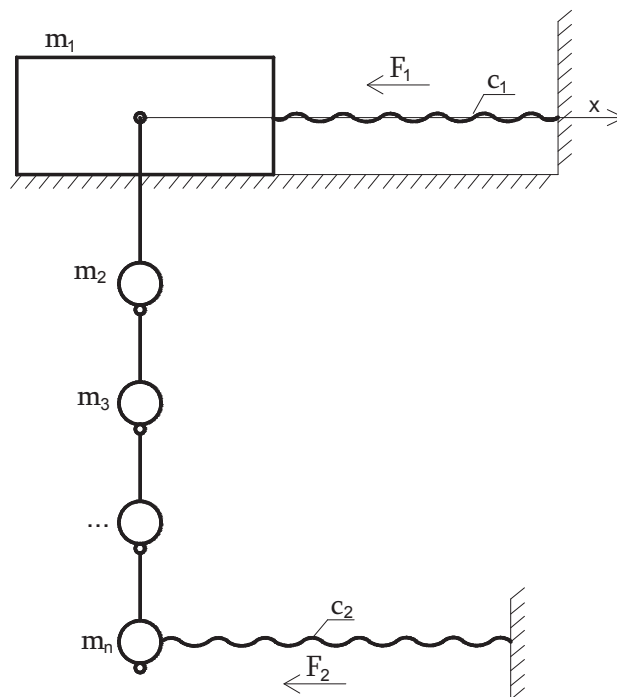


Рис. 5. Динамическая расчетная схема с креплением нижней массы к фундаменту

Преимуществом предложенного здания, кроме описанного выше, является еще и тот факт, что вертикальные элементы каркаса работают на растяжение (см. рис. 1 и 4), в отличие от традиционных зданий, в которых колонны работают на сжатие с изгибом, в результате чего их материал работает с напряжениями, значительно меньшими напряжений при чистом сжатии из-за продольного изгиба колонн. Материал вертикальных несущих элементов каркаса здания в предлагаемом случае может быть использован в полной мере в виду его работы на растяжение. Это, кроме прочего, существенно уменьшит их вес.

Элементы несущей рамы могут быть изготовлены из высокопрочного железобетона. При этом сечение может быть кольцевым, коробчатым или какого-либо другого полого сечения.

Ввиду узлового приложения нагрузки от сооружения через шарнир (см. рис. 1, 3, 4) трубы-стойки загружены практически центральной сжимающей силой, причем как от действия вертикальной нагрузки (полезная нагрузка и вес конструкций), так и от действия горизонтальной нагрузки (сейсмическое воздействие, ветровая нагрузка).

Следует обратить внимание, что горизонтальные сейсмические силы в стойках несущей рамы будут весьма и весьма малы ввиду того, что масса элементов рамы в десятки раз меньше массы сооружения. Само же здание или сооружение будет только раскачиваться при действии сейсмической силы. Конечно, в элементах каркаса подвешенного здания также будут возникать усилия, но эти усилия не будут складываться от этажа к этажу, как это происходит в традиционных зданиях.

Ограничители горизонтального перемещения от действия ветровых нагрузок могут выключиться (например, разорваться) при действии сейсмических сил, но воспринимать полную ветровую нагрузку, а могут быть и стационарными. В таком случае система рассчитывается по расчетной схеме, приведенной на рис. 5.

#### **Выводы и перспективы исследований.**

Преимуществом предложенного в [1] и развитого в настоящей статье подвесного сооружения является факт существенного уменьшения сейсмических сил. Элементы несущей рамы могут быть изготовлены как из железобетона, так и из металла. Предложенная методика динамического расчета системы с использованием уравнений Лагранжа второго рода позволяет достаточно просто получить уравнения движения системы, в том числе при различном представлении расчетной схемы по рис. 2 или 5. Имея уравнения движения системы легко определить динамические усилия и реакции в связях.

В перспективе предполагается совершенствование предложенного способа определения динамических реакций путем введения в расчетную динамическую схему многомассового элемента, показанного на рис. 3 и 5, а также рассмотрение пространственного расчета в отличие от рассмотренного здесь плоского варианта.

1. Азізов Т.Н. Конструкція сейсмічно стійкої будівлі / Патент на корисну модель №54247. Україна. Бюлл. №20. 25.10.2010. 2. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. – М.: Стройиздат, 1976. – 229 с. 3. Мещерский И.В. Сборник задач по теоретической механике. Учебное пособие – 36-е изд. / И.В. Мещерский. – М: Наука, 1986. – 418 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.: НДБК, 2004. – С. 210-217. 7. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция зданий и сооружений / Промышленное и гражданское строительство, 1997, № 12. – С. 37-39.