



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N1, TOM 15 (2009) 31-38

УДК 624.072

(09)-0180-1

АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ВИСЯЧИХ ПРОСТОРОВИХ СТРИЖНЕВИХ ПОКРИТТІВ

А.А. Свентіков

*Воронезький державний архітектурно-будівельний університет
вул. 20-ліття Жовтня, 84, 394006, м. Воронеж, Росія.
E-mail: as102008@yandex.ru*

Отримана 10 жовтня 2008; прийнята 23 січня 2009

Анотація. Запропоновано кінцево-елементні моделі гнучких ниток у геометрично і конструктивно нелінійних постановках. Нелінійне деформування гнучких елементів описується кубічним рівнянням. Виявлено, що основним фактором, що впливає на "виведення" гнучких стержнів з розрахункової схеми конструкції, є розпір нитки при "нульових" зсувах опорних перетинів. Для характеристики нелінійного поведіння гнучких елементів виведений узагальнюючий коефіцієнт нелінійного поведіння. Вивчено закономірності деформування висячого просторового покриття з використанням перехресних несучих ниток і двоякопохилих підвісок. Виявлено характерні зони деформування висячого просторового покриття.

Ключові слова: гнучка нитка, стержень, напруга, покриття.

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВИСЯЧИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

А.А. Свентиков

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 20-летия Октября, 84, 394006, г. Воронеж, Россия.
E-mail: as102008@yandex.ru*

Получена 10 октября 2008; принята 23 января 2009

Аннотация. Предложены конечно-элементные модели гибких нитей в геометрически и конструктивно нелинейных постановках. Нелинейное деформирование гибких элементов описывается кубическим уравнением. Выведено, что основным фактором, влияющим на "выключаемость" гибких стержней из расчетной схемы конструкции, является распор нити при "нулевых" смещениях опорных сечений. Для характеристики нелинейного поведения гибких элементов выведен обобщающий коэффициент нелинейного поведения. Изучены закономерности деформирования висячего пространственного покрытия с использованием перекрестных несущих нитей и двояко-наклонных подвесок. Выведены характерные зоны деформирования висячего пространственного покрытия.

Ключевые слова: гибкая нить, стержень, напряжение, покрытие.

ANALYSIS OF A NONLINEAR WARPING OF TRAILING SPATIAL ROD COVERINGS

A.A. Sventikov

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering,
84, 20th Anniversary of October Str., 394006, Voronezh, Russia.
E-mail: as102008@yandex.ru

Received 10 October 2008; accepted 23 January 2009

Abstract. Finite-element models of flexible strings in geometrically and structurally nonlinear statements are offered. A nonlinear warping of flexible elements is described by the cubic equation. It is found out that a major factor influencing flexible cores eliminating out of a structure design scheme is a string outward thrust at "zero" displacements of basic sections. To characterize a nonlinear behaviour of flexible elements, there was derived a generalizing factor of the nonlinear behaviour. Laws of warping a trailing spatial covering with the use of cross bearing strings and double-inclined suspension brackets have been studied. Specific zones of warping a trailing spatial covering have been found.

Keywords: flexible string, core, pressure, covering.

На современном этапе одним из важнейших направлений развития строительных конструкций является разработка и исследование конструктивных систем, направленных на увеличение использования прочностных свойств материалов. Одним из эффективных конструкций данного типа являются висячие комбинированные системы, в которых основными несущими элементами являются высокопрочные растянутые гибкие нити. Ключевой проблемой, определяющей применение висячих конструкций в строительстве, является их повышенная деформативность. Наиболее эффективным способом стабилизации висячих покрытий является повышение пространственности данных конструкций. При этом используются следующие конструктивные мероприятия: объединение плоских висячих поперечников в один пространственный блок с помощью продольных балок, применение перекрестных несущих нитей и наклонных подвесок, а также устройства над колоннами трехгранных пространственных ферм, образованных двояко-наклонными надбалочными стойками и продольными балками по их оголовкам [1,2]. Разработка эффективных алгоритмов расчета висячих пространственных покрытий и изучение их нелинейного поведения является актуальной задачей повышения использования высокопрочных материалов.

Настоящая работа посвящена анализу напряженно-деформированного состояния висячего

пространственного покрытия в геометрически нелинейной постановке, т.е. без учета развития пластических деформаций. В качестве основного расчетного метода принят метод конечных элементов в форме метода перемещений. При составлении расчетных схем гибкие элементы аппроксимируются идеализированными прямолинейными стержнями. При этом несущие нити разбиваются таким образом, чтобы очертание полученной ломанной линии было достаточно близко к форме исходной гибкой нити.

Предварительно укажем несколько особенностей поведения гибких нитей под нагрузкой [1,3,4]:

- гибкая нить ввиду малости изгибной жесткости не может воспринимать сжимающие усилия и всегда находится в условиях центрального растяжения;
- гибкая нить воспринимает преимущественно узловую нагрузку, которая прикладывается через концевые закрепления (исключение составляют ветровая нагрузка и собственный вес).

Выведем разрешающие уравнения гибкой нити (рис.1). При этом будем считать, что нить пологая.

Запишем условие неразрывной деформативности гибкой нити:

$$L_{\theta} = L_0 + \Delta L, \quad (1)$$

где L_0, L_0 — длина нити в деформированном и начальном состоянии; ΔL — продольная деформация нити;

$$L_0 = l, \quad (2)$$

$$L_0 = l + \Delta + \frac{D}{2 \cdot H^2}, \quad (3)$$

где l — пролет нити; Δ — перемещение концевых закреплений; D — грузовой параметр;

$$D = \frac{q^2 \cdot l^3}{12}, \quad (4)$$

где q — погонная равномерно распределенная нагрузка (собственный вес);

$$\Delta L = \varepsilon \cdot L \approx \varepsilon \cdot l, \quad (5)$$

где ε — относительная продольная деформация нити.

Учитывая, что материал нити подчиняется закону Гука и она всегда находится в условиях центрального растяжения, можно записать:

$$\varepsilon = \frac{H}{E \cdot A}, \quad (6)$$

где H — распор в нити; E — линейный модуль упругости материала нити; A — площадь поперечного сечения нити.

Подставляя (2) - (6) в (1), получим следующее выражение для перемещения концевых сечений нити.

$$\Delta = \frac{H \cdot l}{E \cdot A} - \frac{q^2 \cdot l^3}{24} \cdot \frac{1}{H^2}, \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{H \cdot l}{E \cdot A} \cdot \left(1 - \frac{q^2 \cdot l^2}{24} \cdot E \cdot A \cdot \frac{1}{H^3} \right). \quad (8)$$

Из формулы (7) видно, что перемещения гибкой нити складываются из упругих удлинений и кинематических (геометрических) перемещений. Последние являются основной причиной геометрической нелинейности висячих систем.

Преобразуем зависимость (7) с целью определения распора:

$$H^3 - E \cdot A \cdot \frac{\Delta}{l} \cdot H^2 - E \cdot A \cdot \frac{q^2 \cdot l^3}{24} = 0. \quad (9)$$

Отметим, что свободный член кубического уравнения (9) является кубом распора нити при перемещении ее концевых закреплений равным нулю.

$$H_0^3 = E \cdot A \cdot \frac{q^2 \cdot l^3}{24}, \quad (10)$$

где H_0 — распор нити при нулевом смещении ее концевых закреплений.

Тогда выражение (8) запишется в следующем виде:

$$\Delta = \frac{H \cdot l}{E \cdot A} \cdot \left(1 - \left(\frac{H_0}{H} \right)^3 \right). \quad (11)$$

Введем следующие безразмерные параметры:

$$\delta = \frac{\Delta}{l}; \quad t = \frac{H}{E \cdot A}; \quad u = \frac{q \cdot l}{E \cdot A}. \quad (12)$$

Отметим, что параметр t характеризует продольную нагруженность, а параметр u — физические характеристики нити. В безразмерном виде зависимость (9) будет иметь следующий вид:

$$t^3 - \delta \cdot t^2 - \frac{1}{24} \cdot u^2 = 0. \quad (13)$$

На рис.1 представлен график зависимости δ от t при постоянном параметре u . Уравнение (13), при разных соотношениях коэффициентов, может иметь три действительных, либо один действительный и два комплексных сопряженных корня. Графически это отвечает двум разным ветвям слева и справа от вертикальной оси. Ввиду того, что гибкая нить не может воспринимать сжимающие усилия, левая часть графика будет фиктивной, лишь формально являющейся решением уравнением (13).

Анализируя полученный график (см. рис.1), можно заметить, что гибкая растянутая нить в процессе деформирования в геометрически нелинейной постановке имеет два характерных состояния, отличающиеся друг от друга различным

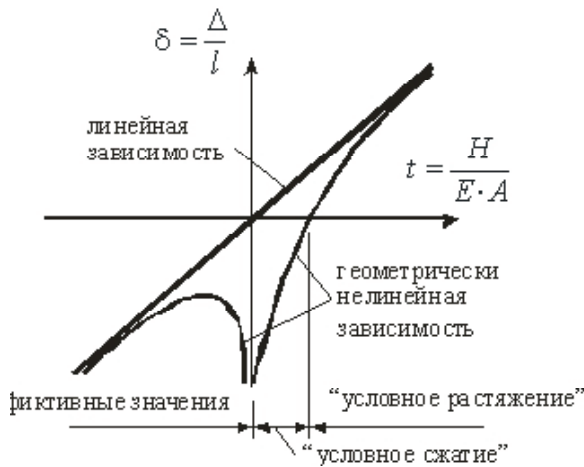


Рис. 1. Зависимость относительных продольных перемещений гибкой нити от параметра нагруженности.

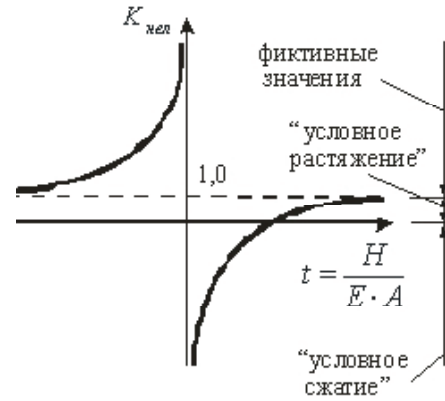


Рис. 2. Зависимость коэффициента нелинейного поведения гибкой нити от параметра нагруженности.

положением опорных закреплений. Для обозначения выявленных состояний гибкой нити по аналогии с поведением центрально нагруженных линейно-деформирующихся стержней будем называть состояние соответствующее раздвижке опорных закреплений "условным растяжением", а сдвижке — "условным сжатием".

Из анализа выражения (8) видно, что нелинейность поведения гибкой нити под нагрузкой характеризует сомножитель в круглых скобках. Обозначим эту величину:

$$K_{нел} = 1 - \frac{q^2 \cdot l^2}{24} \cdot E \cdot A \cdot \frac{1}{H^3}, \quad (14)$$

где $K_{нел}$ — коэффициент нелинейного поведения нити.

Или, согласно (11):

$$K_{нел} = 1 - \left(\frac{H_0}{H} \right)^3. \quad (15)$$

На рис.2 показан график изменения $K_{нел}$ в зависимости от продольной нагруженности гибкой нити. Исходя из зависимостей (14), (15). Левая часть этого графика ($K_{нел} > 1$) будет соответствовать отрицательному значению распора, но так как нить всегда растянута, она физически не реализуется (соответствует фиктивным значениям). Коэффициент нелинейности мо-

жет быть положительным, что соответствует расхождению концевых закреплений ("условному растяжению") и отрицательным — соответствует сближению концевых закреплений ("условному сжатию").

Исходя из анализа зависимостей (11), (15) и графиков рис.1, рис.2, можно отметить, что основным параметром, влияющим на повисания гибких нитей, является распор при нулевых смещениях концевых закреплений. При незначительных величинах H_0 (в небольших по длине наклонных гибких стержнях) данным фактором нелинейного поведения можно пренебречь и учитывать только выключаемость из работы "сжатых" нитей. В этом случае мы имеем так называемый конструктивно нелинейный расчет висячих конструкций [1,4], являющийся таким образом частным случаем геометрически нелинейного расчета. На рис.3 показаны предложенные модели деформирования гибких нитей в геометрически и конструктивно нелинейной постановке.

Ввиду того, что при матричном расчете многоэлементных конструкций при решении системы разрешающих уравнений основная доля затрат машинного времени приходится на разложение матрицы жесткости (прямой ход решения), для нахождения адекватного действительному напряженно-деформированному состоянию использовался метод упругих решений [5,6].

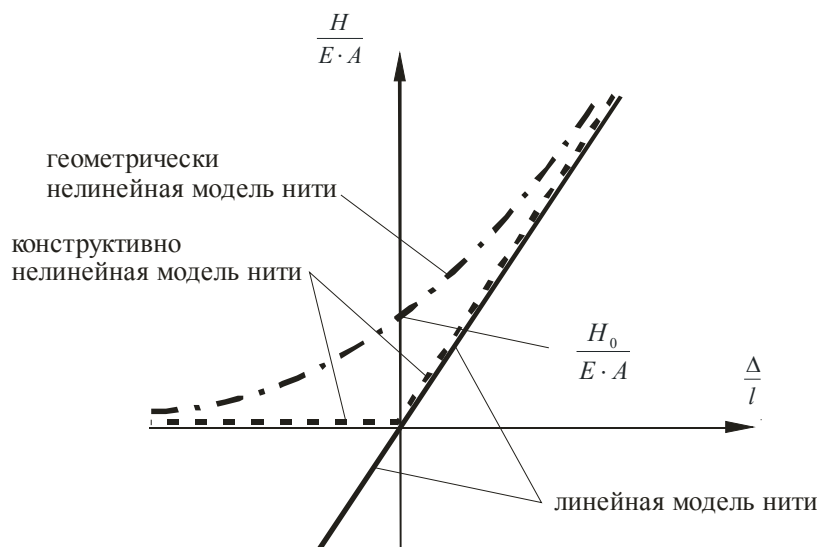


Рис. 3. Модели деформирования гибкой нити.

В качестве изучаемой системы принята висячая пространственная стержневая конструкция покрытия производственного здания с использованием перекрестных несущих нитей и двояко-наклонных подвесок (рис.4). Основные компоновочные параметры: пролет $L = 60$ м, стрела провеса $f = 9$ м ($1/8 L$); высота колонн до балок жесткости $h = 18$ м; зазор между несущими нитями и балками жесткости $z = 1,5$ м; шаг колонн и продольных балок - 12 м; количество пролетов - 3; количество шагов колонн - 6; угол наклона оттяжек к горизонту 45° (висячая конструкция с внешним восприятием распора); характеристика продольных деформаций $p_0 = 5,3 \cdot 10^{-5}$ [4]. Изучение напряженно-деформированного состояния выполнялось при следующих двух видах временной нагрузки: равномерно распределенная нагрузка G_0 по всей площади центрального пролета; сосредоточенная нагрузка P_0 в среднем сечении средней балки жесткости центрального пролета. Система рассматривалась с несколькими значениями постоянной нагрузки, которая моделировалась, как равномерно распределенная по всей площади покрытия.

По результатам геометрически нелинейных расчетов было выявлено, что висячая пространственная многопролетная система имеет следующие зоны работы ее гибких элементов (рис.5.а):

- зона А: загруженный центральный пролет;
- зона Б: половина незагруженного (крайнего) пролета, смежного с загруженным;
- зона В: половина незагруженного пролета более отдаленная от центрального пролета (смежная с системой оттяжек).

Также на рис.5 приведены графики нелинейного поведения несущих нитей висячей пространственной конструкции.

Было выявлено, что при возрастании интенсивности нагрузки висячая пространственная конструкция проходит следующие этапы деформирования.

Этап №1 — начальный. На этом этапе временная нагрузка имеет незначительную величину, вследствие чего наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции оказывает постоянная нагрузка и соответственно максимальные прогибы наблюдаются в крайних пролетах. При этом изменения в расчетной схеме конструкции в основном происходят за счет выключения или включения в работу системы восходящих подвесок смежных с надколонными стойками загруженного пролета.

Этап №2 — условно линейный этап. На этом этапе рабочая схема конструкции (расчетная схема висячей системы с "выключенными" из работы конструкции "сжатыми" гибкими

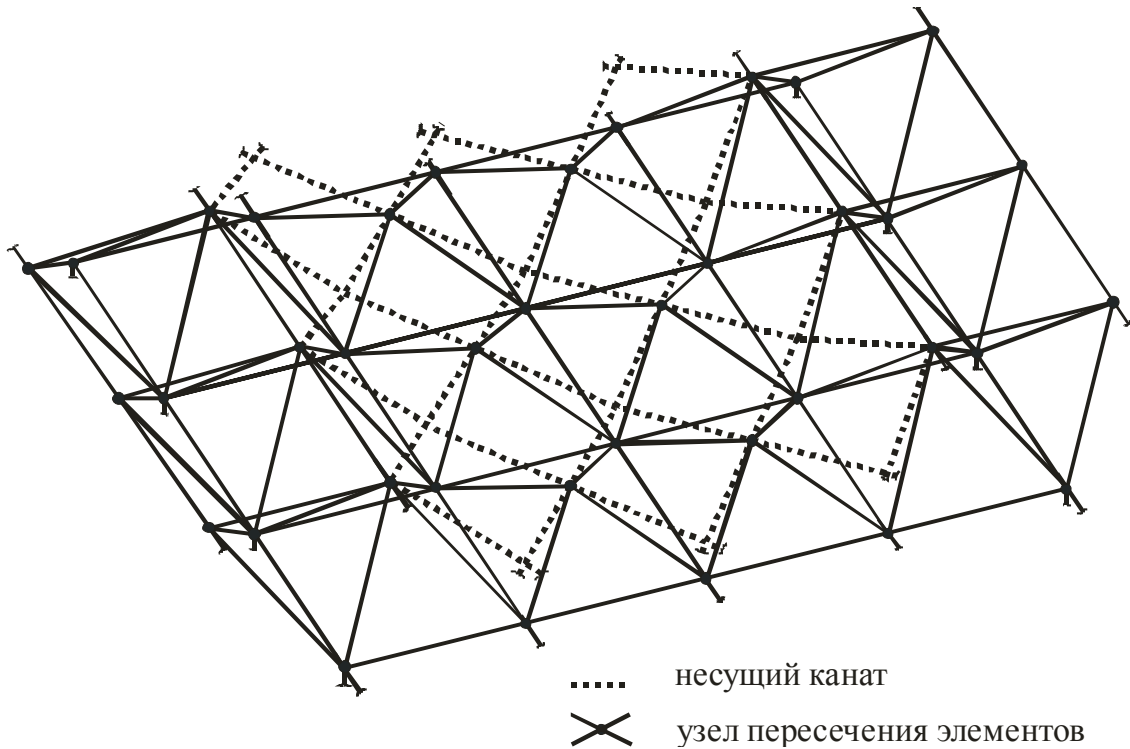


Рис. 4. Пространственная висячая стержневая система.

элементами [4]) стабилизируется и практически не имеет изменений.

Этап №3 — нелинейный этап. На данном этапе происходят следующие структурные преобразования в расчетной схеме конструкции. В загруженном пролете начинают выключаться нисходящие подвески, а также несущие нити в торцевых зонах. В незагруженных пролетах в полупролетах смежных с центральным пролетом происходит перераспределение нагрузки от подвесок к несущим нитям, в полупролетах смежных с системой оттяжек наиболее напряженными являются восходящие подвески.

Этап №4 — квазилинейный этап. На данном этапе изменение интенсивности нагрузки не оказывает практически никакого влияния на расчетную схему конструкции. Напряженное состояние гибких нитей также не претерпевает существенных изменений.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что пространственные висячие стержневые конструкции обладают значительной геометрической

нелинейностью и при анализе их напряженно-деформированного состояния необходимо учитывать провисания гибких нитей.

Литература

1. Кирсанов Н.М. Висячие покрытия производственных зданий.— М.: Стройиздат, 1990.— 128 с.
2. Свентиков А.А. Висячее многопролетное покрытие производственного здания, Патент РФ №2055128 от 27.02.1996 г., М.кл. Е 04 В 7/14.
3. Качурин В.К., Брагин А.В., Ерунов Б.Г. Проектирование висячих и вантовых мостов.— М.: Транспорт, 1971.— 280 с.
4. Стрелецкий Н.Н. Решетчатые комбинированные системы мостов.— М.: Дориздат, 1953.— 219 с.
5. Филин А.П. Современные методы расчета сложных статически неопределимых систем.— Л.: Судпромиз, 1981.— 876 с.
6. Свентиков А.А. Нелинейный расчет висячих стержневых конструкций// Пространственные конструкции зданий и сооружений: (Исследование, расчет, проектирование и применение): Сб.статей. Вып.8 / Ассоциация "Пространственные конструкции"; Белгородская государственная технологическая академия строительных материалов.—М.-Белгород: Изд.БелГТАСМ, 1996.— С.72-82

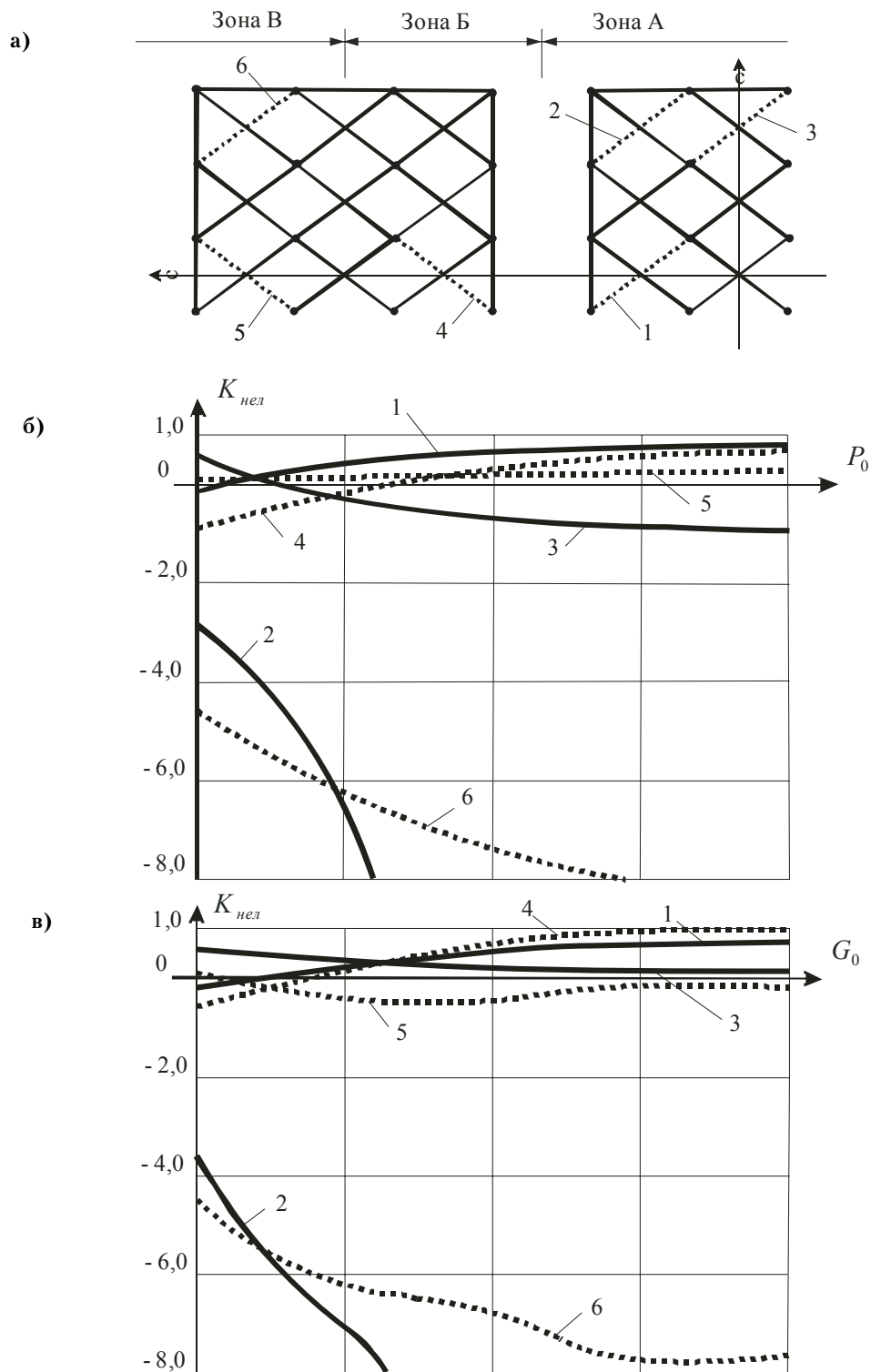


Рис. 5. Графики изменения нелинейного поведения несущих нитей: а — план расположения несущих нитей; б,в — графики изменения коэффициента нелинейности гибких нитей в зависимости от интенсивности сосредоточенной и распределенной нагрузки.

Свентиков Андрій Олександрович — доцент кафедри "Металеві конструкції й зварювання в будівництві" Воронежського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: просторові покриття будинків і споруджень, висячі стрижневі системи підвищеної твердості з використанням гнучких елементів.

Свентиков Андрей Александрович — доцентом кафедры "Металлические конструкции и сварка в строительстве" Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: пространственные покрытия зданий и сооружений, висячие стержневые системы повышенной жесткости с использованием гибких элементов.

Sventikov Andrey Aleksandrovich is a senior lecturer of the faculty "Metal Structures and Welding in Construction" of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Scientific interests: spatial coverings of buildings and structures, trailing rod systems of a higher rigidity with the use of flexible elements.