

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКОЙ НИТИ

Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATIONS IN MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A FLEXIBLE FILAMENT

D. A. Tarasov, A. V. Lipov, A. M. Irishkov

Аннотация. *Предмет и цель работы.* В настоящее время в инженерной практике все чаще находят применение композитные материалы, позволяющие учитывать работу в упругопластической области. Появляется необходимость изучения влияния физической нелинейности материала на напряженно-деформированное состояние конструкций. Это особенно важно для систем, моделирование работы которых ведется с учетом геометрической нелинейности. К таким системам можно отнести конструкции, несущую способность которых обеспечивают гибкие нити. *Методы.* Исследования проведены с помощью предложенного метода, основанного на теории математического моделирования с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления функций одной и нескольких переменных, а также положений сопротивления материалов. *Результаты и выводы.* Проведен сравнительный анализ данных, полученных с помощью линейного и физически нелинейного расчета при разных величинах динамической нагрузки. Выявлены зависимости влияния пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние гибкой нити. Для определения истинного поведения от внешнего воздействия моделирование работы гибкой нити необходимо вести с учетом развития пластических деформаций материала.

Ключевые слова: напряжения, деформации, гибкая нить, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность.

Abstract. *Subject and goals.* Currently, in engineering practice, composite materials are increasingly being used, allowing for the work in the elastic-plastic area. There is a need to study the influence of physical nonlinearity of the material on the stress-strain state of structures. This is especially important for systems that are modeled using geometric nonlinearity. Such systems include structures that have a load-bearing capacity that is provided by flexible threads. *Methods.* The research was carried out using the proposed method based on the theory of mathematical modeling using the apparatus of differential and integral calculus of functions of one and several variables, as well as the positions of the resistance of materials. *Results and conclusions.* A comparative analysis of data obtained using linear and physically nonlinear calculations for different values of dynamic load is carried out. The dependences of the influence of plastic deformations on the stress-strain state of a flexible thread are revealed. To determine the true behavior from external influences, modeling of the flexible thread must be carried out taking into account the development of plastic deformations of the material.

Keywords: stresses, deformations, flexible thread, physical nonlinearity, geometric nonlinearity.

Введение

Все чаще в инженерной практике в качестве материала основных силовых элементов, обеспечивающих прочность конструкций при внешнем воздействии, находят применение композиты, работающие за пределами упругой зоны диаграммы деформирования. Таким образом, появляется необходимость оценки влияния физической нелинейности материала на возникающее напряженно-деформированное состояние (НДС) в указанных элементах. Это особенно важно для механических систем, моделирование работы которых ведется с учетом геометрической нелинейности. К таким механическим системам относятся конструкции, для которых расчетной схемой является гибкая нить. Примером подобных конструкций служат синтетические канаты, представляющие собой основные силовые элементы противотаранных устройств [1–3]. Данные устройства имеют различные конструктивные исполнения [4–7] и предназначены для защиты жизни и здоровья людей, а также охраняемых объектов путем создания физического препятствия несанкционированному продвижению транспортных средств на охраняемую территорию и их принудительной остановки. Однако в настоящее время определение НДС отдельных гибких нитей ведется без учета пластических деформаций материала с использованием известных методик, вошедших в нормативную литературу [8].

Целью настоящей работы является исследование влияния развития пластических деформаций в материале на НДС гибкой нити, испытывающей поперечный удар. Для этого проведем сравнительный анализ результатов, полученных с помощью линейного и физически нелинейного расчета при разных величинах динамической нагрузки.

Материалы и методы

Рассмотрим метод математического моделирования НДС гибкой нити, расчетная схема которой представлена на рис. 1. В основу рассматриваемого метода положена диаграмма состояния материала, представленная на рис. 2. При этом нагрузкой, вызывающей внутренние усилия и перемещения исследуемой геометрически нелинейной системы, является поперечная кратковременная динамическая нагрузка q_1 , заданная импульсом ударяющего транспортного средства (тела), движущимся в горизонтальной плоскости [9–11].

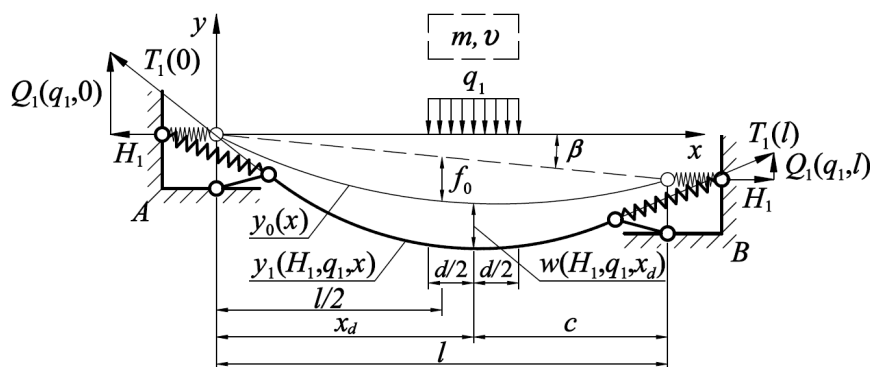


Рис. 1. Расчетная схема гибкой нити:

— — начальное состояние линии равновесия;
 — — конечное состояние линии равновесия

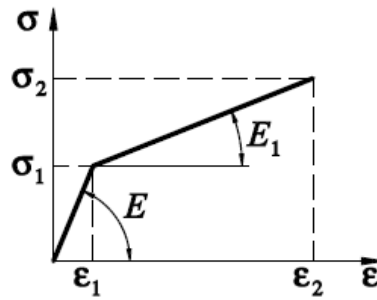


Рис. 2. Диаграмма деформирования

Кусочно-линейная диаграмма деформирования, определяющая связь между напряжениями и относительными деформациями, состоит из двух сегментов и, в зависимости от угла наклона второго сегмента, может выступать в виде диаграммы напряжений с линейным упрочнением без площадки текучести или в виде диаграммы Прандтля (упругопластическое тело). При этом необходимо указать основные параметрические точки диаграммы, такие как максимальные напряжения и соответствующие относительные деформации, граничные значения и т.п. [12].

Уравнения, характеризующие работу рассматриваемой механической системы от внешнего воздействия, описывают изменения по длине гибкой нити напряжений и деформаций, включающих кинематические перемещения. Данные уравнения имеют вид [13–15]:

– главные напряжения:

$$\sigma_1(x) = \frac{T_1(x)}{A}; \quad \sigma_2(x) = \sigma_3(x) = 0, \quad (1)$$

где $T_1(x)$ – функция продольного усилия, Н; A – площадь поперечного сечения, м²; x – текущая абсцисса ($0 \leq x \leq l$), м; l – пролет гибкой нити, м;

– перемещения:

$$w(H_1, q_1, x) = y_1(H_1, q_1, x) - y_0(x), \quad (2)$$

где $y_1(H_1, q_1, x)$ – ордината сечения конечной линии равновесия, вызванная действием поперечной кратковременной динамической нагрузки, м; $y_0(x)$ – ордината сечения начальной линии равновесия от собственного веса, м; H_1 – распор, Н; q_1 – поперечная кратковременная динамическая нагрузка, Н, при $d = 0$ м (Н/м при $d > 0$ м, здесь d – ширина зоны контакта, м).

В уравнении (1) функция продольного усилия определяется так [16, 17]:

$$T_1(x) = \sqrt{H_1^2 + (Q_1(q_1, x) + H_1 \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (3)$$

где $Q_1(q_1, x)$ – функция поперечной силы в шарнирно опертой балке пролетом l от внешнего воздействия, Н; β – угол наклона хорды AB , соединяющей точки крепления, град.

В свою очередь, главные напряжения σ_2 и σ_3 равны нулю, так как гибкая нить способна сопротивляться только растяжению, а жесткость при кручении и изгибе отсутствует. Данное допущение является общепринятым при моделировании работы таких механических систем.

В уравнении (2) в параметры функций включены распор H_1 и поперечная кратковременная динамическая нагрузка q_1 , так как они не известны на момент определения прогиба. Для нахождения указанных параметров необходимо решить систему уравнений с двумя неизвестными, состоящую из уравнения закона сохранения механической энергии и условия неразрывности деформаций, полученную в работах [13, 16]:

$$\begin{cases} \Delta\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \frac{1}{2}q_1 \int_{x_d - \frac{d}{2}}^{x_d + \frac{d}{2}} w(H_1, q_1, x) dx; \\ L_0 + \Delta L(H_1, q_1) = L_1(H_1, q_1), \end{cases} \quad (4)$$

где m – масса ударяющего тела, кг; v – скорость ударяющего тела, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; x_d – абсцисса центра зоны контакта, м; L_0 – начальная длина, м; $\Delta L(H_1, q_1)$ – упругопластическая деформация, м; $L_1(H_1, q_1)$ – конечная длина, м.

Запишем выражения по определению всех членов уравнений, составляющих систему (4).

Уравнение, описывающее конечную линию равновесия гибкой нити, имеет вид [17, 18]

$$y_1(H_1, q_1, x) = \frac{M_1(q_1, x)}{H_1} + x \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

где $M_1(q_1, x)$ – функция изгибающего момента в шарнирно опертой балке пролетом l от внешнего воздействия, Н·м.

Кривую начального очертания, образованную под действием собственного веса гибкой нити, с достаточной степенью точности можно представить в виде уравнения параболы [17, 18]:

$$y_0(x) = \frac{4f_0}{l^2}x^2 - \frac{4f_0}{l}x - x \operatorname{tg} \beta, \quad (6)$$

где f_0 – стрела провеса от действия собственного веса в середине пролета, м.

Внутренние усилия при изгибе в однопролетной шарнирно опертой балке определяются следующим образом [13, 16]:

$$\begin{aligned} Q_1(q_1, x) = \frac{q_1 dc}{l}(x \geq 0) - q_1 \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right] \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ + q_1 \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right] \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_1(q_1, x) = \frac{q_1 dc}{l}x(x \geq 0) - q_1 \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ + q_1 \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где c – расстояние от центра зоны контакта до опоры B , м.

Длина дуги кривой между точками крепления равна первоначальной длине гибкой нити и вычисляется по формуле [17, 18]

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx. \quad (9)$$

Конечная длина равна [13]

$$L_1(H_1, q_1) = \int_0^{l - \frac{2}{u} H_1} \sqrt{1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2} dx, \quad (10)$$

где u – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

В работах [13, 15, 16] получено уравнение по определению упругих деформаций, основанное на законе Гука:

$$\Delta L(H_1, q_1) = \frac{H_1}{EA} \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx, \quad (11)$$

где E – модуль упругости, Па.

Вместе с тем определять удлинение гибкой нити за пределами упругой работы материала по формуле (11) уже нельзя.

Необходимо по диаграмме деформирования, зная напряжения, найти относительную деформацию, а по ней определить искомое удлинение.

Растягивающие напряжения определяются из выражения [10]

$$\sigma(H_1, q_1) = \frac{H_1}{AL_0} \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx. \quad (12)$$

В свою очередь, при заданной диаграмме деформирования материала гибкой нити удлинение рассчитывается следующим образом [10]:

$$\Delta L(H_1, q_1) = \begin{cases} \frac{\sigma(H_1, q_1) L_0}{E} & \text{при } \sigma(H_1, q_1) < \sigma_1; \\ L_0 \left(\frac{\sigma(H_1, q_1) - \sigma_1}{E_1} + \varepsilon_1 \right) & \text{при } \sigma_1 \leq \sigma(H_1, q_1) < \sigma_2, \end{cases} \quad (13)$$

где E_1 – модуль упрочнения на 2-м сегменте диаграммы деформирования, Па.

Модуль упрочнения материала на 2-м сегменте диаграммы деформирования определяется из уравнения [10]

$$E_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (14)$$

После того, как определены все члены уравнений, составляющих систему (4), ее можно решить одним из численных методов, например методом сопряженных градиентов.

Общая последовательность моделирования НДС гибкой нити, с учетом развития пластических деформаций в материале при действии поперечной кратковременной динамической нагрузки, отражена на рис. 3 в виде схемы. Предложенный метод реализован с помощью численных процедур решения в виде проблемно-ориентированного программного комплекса [19]. Данный

программный комплекс позволил провести расчеты и принять конструктивные решения при проектировании противотаранных устройств [4–7] с дальнейшей постановкой разработанных изделий на производство и серийным выпуском, что подтверждается сертификатами соответствия в системе ГОСТ Р (Сертификат № 0047832, Сертификат № 2116640).

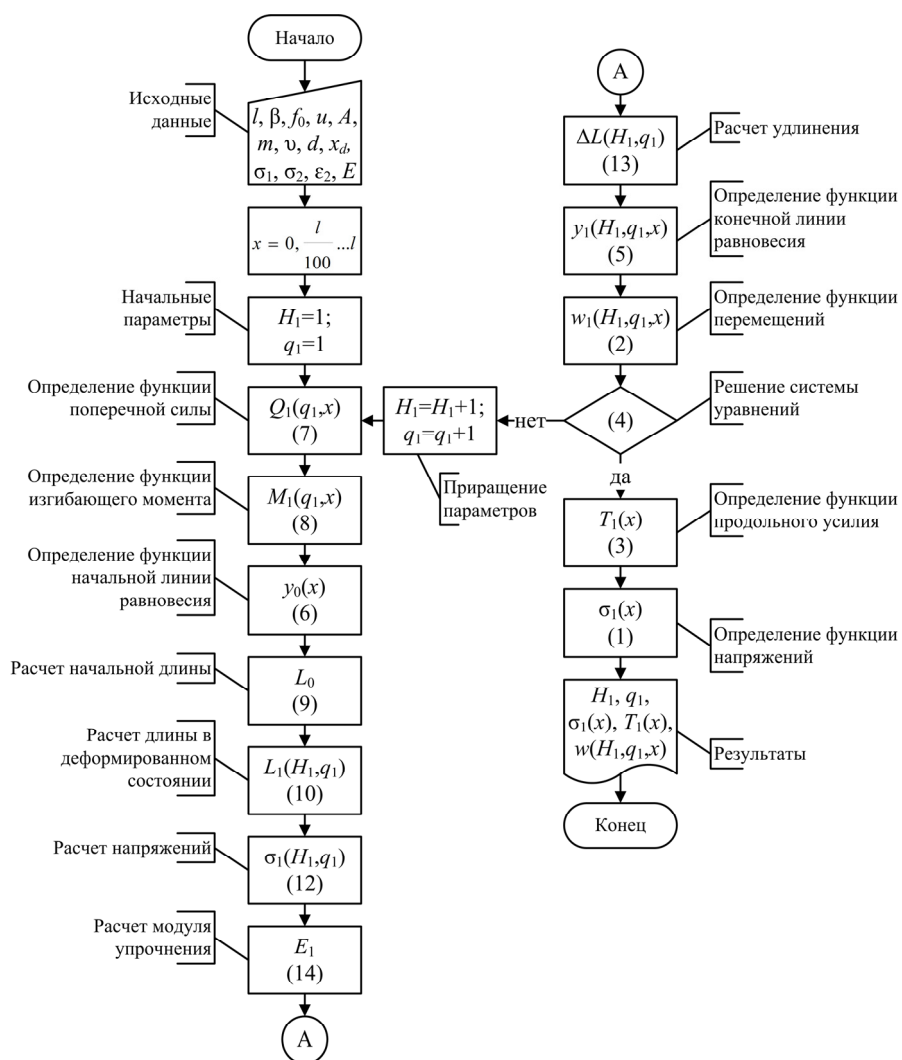


Рис. 3. Схема моделирования НДС гибкой нити

Результаты исследования

В качестве объекта исследования рассмотрим основной силовой элемент противотаранного шлагбаума [4], выполненный из синтетического каната, расчетной схемой которого является гибкая нить, первоначально прямолинейная $f_0 = 0$ м, пролетом $l = 8$ м (ширина перекрываемого проезда шлагбаумом) с жестко закрепленными опорами $u = \infty$, Н/м, расположенными на одном уровне $\beta = 0$ град, сечением $A = 2,316 \cdot 10^{-3}$ м², испытывающая поперечную кратковременную динамическую нагрузку q_1 от ударяющего транс-

портного средства (ГАЗель NEXT) массой $m = 4000$ кг в горизонтальной плоскости посередине пролета $x_d = 4$ м. Ширина зоны контакта $d = 1$ м. Характеристики материала гибкой нити: условный предел текучести $\sigma_1 = 1150$ МПа; временное сопротивление $\sigma_2 = 1350$ МПа; относительное удлинение после разрыва $\varepsilon_2 = 0,05$; модуль упругости $E = 1,471 \cdot 10^5$ МПа.

Для получения выводов рассчитанные при проведенном исследовании значения деформаций, напряжений и поперечной кратковременной динамической нагрузки приведем к следующему безразмерному виду: относительный прогиб $f = \frac{w(H_1, q_1, l/2)}{l} \cdot 100\%$; коэффициент использования прочности

$$k_{\max} = \frac{\sigma_1(l)}{\sigma_2}; \text{ коэффициент динамичности } k_d = \frac{q_1 d}{gm}.$$

Величина относительного прогиба f является критерием способности сопротивляться действию поперечной кратковременной динамической нагрузки и характеризует подверженность гибкой нити деформациям. Выражается в процентном отношении максимального прогиба к пролету.

Оценка несущей способности гибкой нити осуществляется посредством коэффициента использования прочности сечения $k_{\max}$. При этом само значение коэффициента определяет запас прочности для максимально нагруженного сечения. Если несущая способность обеспечивается с запасом, то коэффициент $k_{\max} < 1$. Значение $k_{\max} > 1$ показывает степень перегрузки.

Коэффициент динамичности k_d указывает, во сколько раз поперечная кратковременная динамическая нагрузка, возникающая вследствие удара, больше, чем нагрузка при статическом приложении веса ударяющего тела.

На рис. 4 представлен график изменения относительного прогиба в середине пролета от скорости ударяющего тела, полученный в физически нелинейной постановке задачи, с учетом развития пластических деформаций, а также в линейной постановке, основанной на законе Гука.



Рис. 4. График изменения относительного прогиба

Анализ полученных данных показывает, что в рассматриваемой гибкой нити, с заданными физическими и геометрическими параметрами, пластические деформации начинают возникать при скорости ударяющего тела, равной $v = 8,3$ м/с. После достижения указанного значения скорости при физически нелинейном расчете наблюдается значительный рост деформаций, включающих упругопластические деформации и кинематические перемещения. По аналогии с пластическим деформированием традиционных стальных конструкций, работающих на изгиб, данное состояние гибкой нити предложено называть «условным пластическим шарниром».

На рис. 5 представлен график изменения коэффициента использования прочности максимально нагруженных (приопорных) сечений гибкой нити от скорости ударяющего тела. Из графика видно, что учет развития пластических деформаций приводит к значительному снижению расчетных значений максимальных растягивающих напряжений при увеличивающейся скорости ударяющего тела.

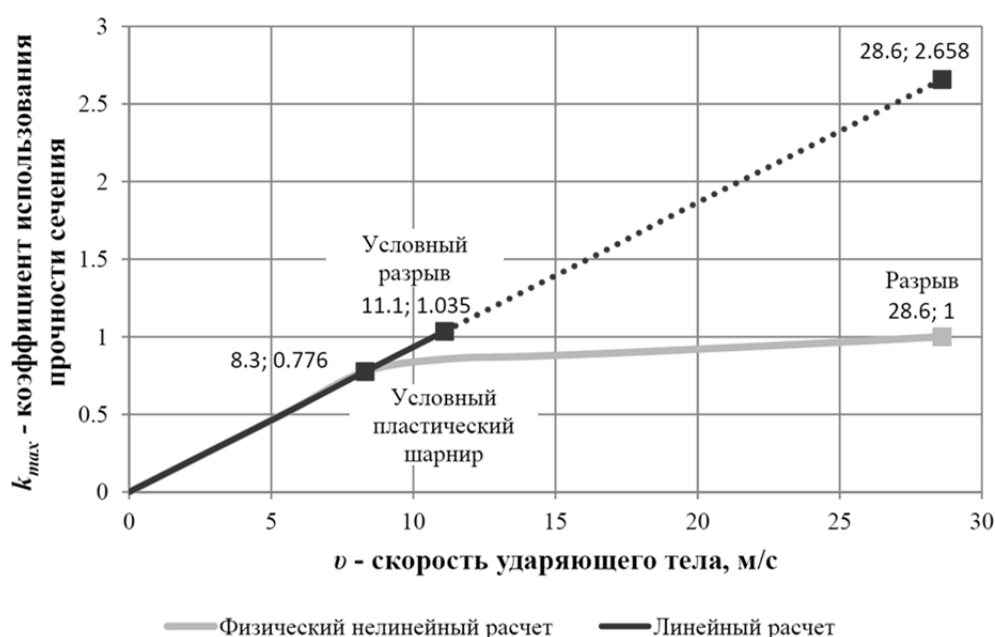


Рис. 5. График изменения коэффициента использования прочности сечения

Следует отметить, что разрыва гибкой нити в физически нелинейной постановке при скорости ударяющего тела, равной $v = 11,1$ м/с, не происходит, хотя в линейной постановке задачи при данной скорости растягивающие напряжения в материале достигают временного сопротивления разрыву. Данное состояние предложено называть «условным разрывом».

На рис. 6 представлен график изменения коэффициента динамичности от скорости ударяющего тела. Анализ графика показывает снижение поперечной кратковременной динамической нагрузки, действующей на гибкую нить в свою очередь возникающей в результате удара горизонтально движущимся телом. Данный факт обусловлен уменьшением жесткости гибкой нити и вызван развитием пластических деформаций в материале.

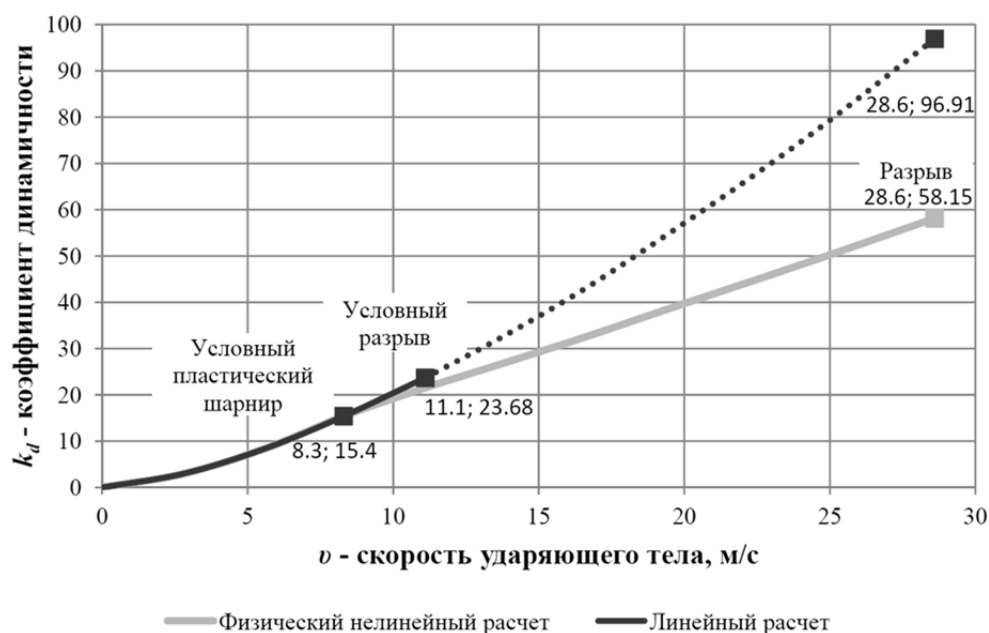


Рис. 6. График изменения коэффициента динамичности

Для обобщения выводов данные, полученные с помощью линейного расчета, использующего в своей основе закон Гука и физически нелинейный расчет, учитывающий реальные свойства материала, приведем к безразмерному виду. Для этого предложено ввести коэффициент нелинейности $k_{нел}$.

Коэффициент нелинейного поведения $k_{нел}$ гибкой нити в физически нелинейной постановке может иметь только положительное значение: равное, больше или меньше 1. Значение, равное 1, соответствует ситуации, когда напряжения, деформации или нагрузка, определяемые как в линейной, так и в физически нелинейной постановке задачи, равны. Это говорит об отсутствии пластических деформаций в материале гибкой нити. Любое другое значение показывает, во сколько раз напряжения, деформации или нагрузка, найденные за пределами упругой зоны работы материала, отличаются от этих же параметров, определенных с помощью линейного расчета, не учитывающего неупругие деформации.

Из анализа графика, представленного на рис. 7, можно сделать вывод о том, что на нелинейность поведения гибкой нити в значительной мере влияет скорость, с которой движется тело в первоначальный момент удара. Это объясняется образованием, а затем дальнейшим развитием пластических деформаций в материале. Причем нелинейность при определении напряжений и поперечной кратковременной динамической нагрузки возникает в большей степени, чем при определении деформаций.

Заключение

В целом на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что на значения возникающих напряжений и деформаций в гибкой нити, а также поперечной кратковременной динамической нагрузки, возникающей вследствие таранного удара транспортным средством, значительное

влияние оказывает развитие пластических деформаций в материале. В силу этого моделирование НДС гибкой нити, испытывающей поперечный удар, предложено вести с учетом физической нелинейности с помощью разработанного метода, отраженного на рис. 3. Это позволит определять истинное НДС гибкой нити при увеличивающейся скорости ударяющего тела и, соответственно, возрастающей поперечной кратковременной динамической нагрузке. В свою очередь, это даст возможность выявлять скрытые резервы прочности либо снижать материалоемкость изделий, а также передаваемые нагрузки на нижележащие конструкции, например, такие как фундаменты противотаранных устройств.

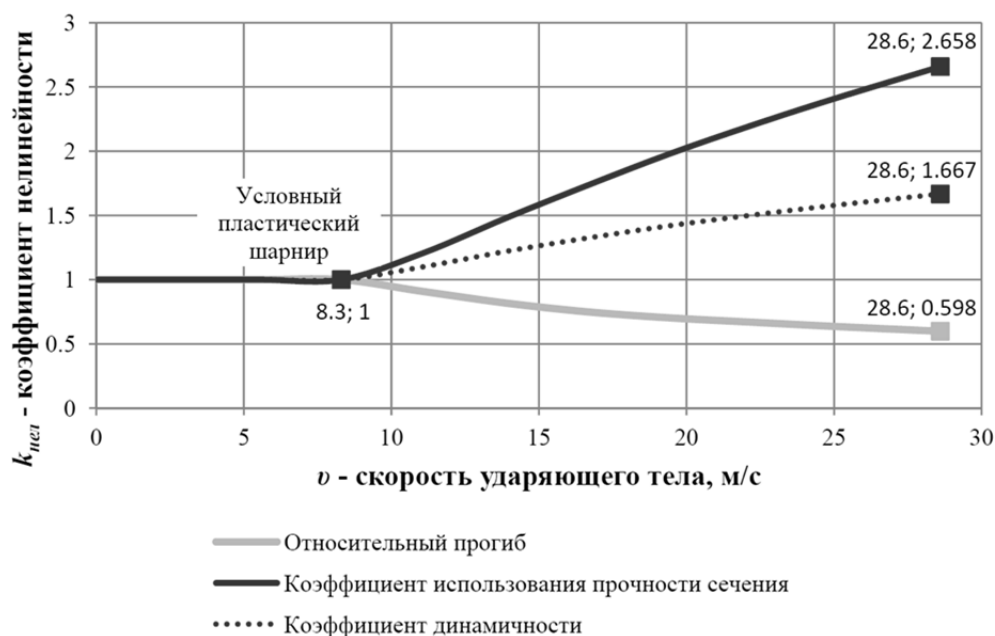


Рис. 7. График изменения коэффициента нелинейности

Библиографический список

1. Тарасов, Д. А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных переездов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1 (18). – С. 111–117.
2. Швецов, А. В. Противотаранное заградительное устройство / А. В. Швецов // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 2-3 (63-64). – С. 58–60.
3. Елисеев, В. В. Моделирование и расчет противотаранного шлагбаума / В. В. Елисеев, Е. А. Оборин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 351–357.
4. Патент № 2621774 РФ. Противотаранный барьер / П. А. Косяков, Д. А. Тарасов, Н. А. Шалашилин, О. Л. Шаповал ; заявл. 21.10.2015 ; опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16. – 11 с.
5. Патент № 2694376 РФ. Противотаранные откатные ворота / А. А. Кодоров, Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, И. В. Васильев, О. Л. Шаповал ; заявл. 24.12.2018 ; опубл. 12.07.2019, Бюл. № 20. – 12 с.
6. Патент № 2668118 РФ. Габион / И. В. Васильев, В. А. Сигаев, Д. А. Тарасов, О. Л. Шаповал ; заявл. 22.11.2017 ; опубл. 26.09.2018, Бюл. № 27. – 11 с.

7. Патент № 191852 РФ. Противотаранное ограждение / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, И. В. Васильев, О. Л. Шаповал ; заявл. 30.12.2019 ; опубл. 26.08.2019, Бюл. № 24. – 8 с.
8. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
9. Безбородов, Р. С. Исследование динамики противотаранной цепи / Р. С. Безбородов, Ю. Л. Рутман // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 4 (63). – С. 119–123.
10. Сильников, Н. М. Обзор зарубежных методик испытания и оценки противотаранных устройств / Н. М. Сильников, П. Д. Панов, А. С. Панков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 11-12 (113-114). – С. 101–108.
11. Осипенко, М. А. Задача об одностороннем контакте гибкой нерастяжимой нити и твердого тела / М. А. Осипенко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 1 (33). – С. 82–87.
12. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности / Д. А. Тарасов, Д. Ю. Семенов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 175–185.
13. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования работы стальных канатов при действии поперечной динамической нагрузки / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 48–55.
14. Дремова, Н. В. Математическая модель в задачах динамических систем с гибкими нитями / Н. В. Дремова, Т. Мавлянов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (4–5 июня 2014 г.) : в 3-х т. / под ред. А. А. Горохова. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 197–201.
15. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования напряженно-деформированного состояния стальных канатов / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12 (16). – С. 114–120.
16. Тарасов, Д. А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 56–62.
17. Biggins, J. S. Understanding the chain fountain / J. S. Biggins, M. Warner // Proc. Roy. Soc. A. – 2014. – P. 470. – DOI 10.1098/rspa.2013.0689.
18. Herrmann, F. The chain fountain with momentum currents / F. Herrmann // Karlsruhe Institute of Technology. – 2015. – URL: http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/Chain_fountain.pdf.
19. Свидетельство № 2018611086 РФ. Программа моделирования напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности материала / Д. А. Тарасов, А. Г. Лебедкин, О. Л. Шаповал ; заявл. 28.11.2017 ; опубл. 23.01.2018, Бюл. № 2. – 1 с.

References

1. Tarasov D. A., Konovalov V. V., Zaytsev V. Yu. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014, no. 1 (18), pp. 111–117. [In Russian]
2. Shvetsov A. V. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport Of The Russian Federation]. 2016, no. 2-3 (63-64), pp. 58–60. [In Russian]
3. Eliseev V. V., Oborin E. A. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* [Modern mechanical engineering. Science and education]. 2014, no. 4, pp. 351–357. [In Russian]

4. Patent № 2621774 RF. *Protivotarannyy bar'er* [Patent No. 2621774 of the Russian Federation. Anti-ramming barrier]. P. A. Kosyakov, D. A. Tarasov, N. A. Shalashilin, O. L. Shapoval; appl. 21.10.2015; publ. 07.06.2017, bull. no. 16, 11 p. [In Russian]
5. Patent № 2694376 RF. *Protivotarannye otkatnye vorota* [Patent No. 2694376 of the Russian Federation. Anti-RAM sliding gates]. A. A. Kodorov, D. A. Tarasov, G. S. Bol'shakov, I. V. Vasil'ev, O. L. Shapoval; appl. 24.12.2018; publ. 12.07.2019, bull. no. 20, 12 p. [In Russian]
6. Patent № 2668118 RF. *Gabion* [Patent No. 2668118 of the Russian Federation. Gabion]. I. V. Vasil'ev, V. A. Sigaev, D. A. Tarasov, O. L. Shapoval; appl. 22.11.2017; publ. 26.09.2018, bull. no. 27, 11 p. [In Russian]
7. Patent № 191852 RF. *Protivotarannoe zagrazhdenie* [Patent no. 191852 of the Russian Federation. Anti-RAM barrier]. D. A. Tarasov, G. S. Bol'shakov, I. V. Vasil'ev, O. L. Shapoval; appl. 30.14.2019; publ. 26.08.2019, bull. no. 24, 8 p. [In Russian]
8. *Posobie po proektirovaniyu stal'nykh konstruktsiy (k SNiP II-23-81* «Stal'nye konstruktsii»)* [Manual for the design of steel structures (SNiP II-23-81* "Steel structures")]. TsNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 1989, 148 p. [In Russian]
9. Bezborodov R. S., Rutman Yu. L. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2017, no. 4 (63), pp. 119–123. [In Russian]
10. Sil'nikov N. M., Panov P. D., Pankov A. S. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism]. 2017, no. 11-12 (113-114), pp. 101–108. [In Russian]
11. Osipenko M. A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of Tomsk state University. Mathematics and mechanics]. 2015, no. 1 (33), pp. 82–87. [In Russian]
12. Tarasov D. A., Semenov D. Yu. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society]. 2017, no. 3 (23), pp. 175–185. [In Russian]
13. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 02 (24), pp. 48–55.
14. Dremova N. V., Mavlyanov T. *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. nauch. tr. 4-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (4-5 iyunya 2014 g.): v 3-kh t.* [Innovation, quality and service in engineering and technology : collection of scientific works. Tr. 4-th Intern. scientific-practical Conf. (June 4-5, 2014): in 3 vols.]. Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2014, vol. 1, pp. 197–201.
15. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2013, no. 12 (16), pp. 114–120. [In Russian]
16. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 02 (24), pp. 56–62. [In Russian]
17. Biggins J. S., Warner M. *Proc. Roy. Soc. A*. 2014, p. 470. DOI 10.1098/rspa.2013.0689.
18. Herrmann F. *Karlsruhe Institute of Technology*. 2015. Available at: http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/Chain_fountain.pdf.
19. *Svidetel'stvo № 2018611086 RF. Programma modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gibkikh nitey s uchetom fizicheskoy nelineynosti materiala* [Certificate no. 2018611086 of the Russian Federation. Program for modeling the stress-strain state of flexible filaments taking into account the physical nonlinearity of the material]. D. A. Tarasov, A. G. Lebedkin, O. L. Shapoval; appl. 28.11.2017; publ. 23.01.2018, bull. no. 2, 1 p. [In Russian]

Тарасов Денис Александрович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизированных систем
безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tarasov.denis.penza@gmail.com

Tarasov Denis Alexandrovich
candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of automated security
systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Липов Александр Викторович
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой компьютерного
проектирования технологического
оборудования,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Lipov Alexander Viktorovich
candidate of technical sciences,
head of sub-department
of computer-aided design
of technological equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ирышков Алексей Михайлович
магистрант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexei.iryshkov@yandex.ru

Iryshkov Aleksey Mihailovich
master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Тарасов, Д. А. Исследование влияния пластических деформаций при моделировании напряженно-деформированного состояния гибкой нити / Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 98–110. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-8.