МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВА РАЗРЫВОВ НА ФРОНТАХ ВОЛН, ВОЗНИКАЮЩИХ В НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ НИТИ

Эргашов Махамматрасул
д-р техн. наук, Ташкентский институт текстильной и л
егкой промышленности, Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mergashov@mail. ru

METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE BREAKING PROPERTY AT WAVE FRONTS, ARISING IN A NON-LINEAR-VISCOUS THREAD

Ergashov Mahammatrasul
Doctor of Technical Sciences, Tashkent Institute of Textile and
Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Предлагается методика исследования влияния смещенных производных на свойств волнового движения нити изготовленной из нелинейно-вязкого материала. Доказано, что в нити, изготовленной из нелинейно-вязкого материала всегда возникают только продольно-поперечные волны, на фронтах которых относительная деформация и все её производные (по времени и координате) терпят разрывы. Установлены выражения, позволяющие проводит качественный анализ поведения параметров движения, относительной деформации и смещенных производных перемещения по времени и координате на фронтах разрывов, возникающих в рассматриваемом материале.

Ключевые слова: нить, волна, продольная волна, поперечная волна, разрыв, коэффициент разрыва, вязкая среда, нелинейно-упругий материал.

Abstract

A method of investigation of the influence of displaced derivatives on the properties of wave motion of the thread made of non-linear-viscous material is proposed. It is proved that in a thread made of non-linear-viscous material only longitudinal-transverse waves always arise, at the fronts of which the relative strain and all its derivatives (in time and coordinate) suffer breaks. Expressions are established that make it possible to conduct a qualitative analysis of the behavior of motion parameters, relative deformation, and shifted derivatives of displacement with respect to time and coordinate at the fronts of discontinuities arising in the material under consideration

Keywords: thread, wave, longitudinal wave, transverse wave, discontinuity, discontinuity coefficient, viscous medium, non-linear elastic material.

Введение

Известно [1-5], что система дифференциальных уравнений, описывающие плоские и пространственные движения всегда замыкается совместно с тремя неголономными уравнениями связи, характеризующими геометрических положений частиц нити в области исследования.

Уравнения связи вытекают из условия гибкости (отсутствие жесткости материала на изгиб и кручение) и возможности занимать элементов нити в области движения произвольные геометрические конфигурации.

Приобщение уравнения связи часто приводит к повышению степени нелинейности дифференциальных уравнений и появлению в правых частях гиперболических уравнений движения слагаемых, содержащих со смешанными частными производными по времени и координате. Последние приводит к появлению некоторых усложнений при исследовании (например, при приведении к каноническому виду [6, 7]) дифференциальных уравнений плоских и пространственных движений гибкой нити по сравнению с аналогичными гиперболическими уравнениями, описывающие, например, малые колебания струны [1-11].В работе [1] исследуется система гиперболических дифференциальных уравнений пространственного движения нелинейно-упругой нити, где уравнения характеристических кривых и, дифференциальные условия, имеющие место на этих кривых, определяются несколько иным по сравнению с традиционными, изложенными, например, в работах [7, 8] методами. В работе [1] доказано, что под действием внешней нагрузки вдоль нелинейно-упругой нити распространяются продольная волна, передний фронт которой двигается со скоростью волны Римана в данной среде и, поперечная волна, идущая вдоль нити с меньшей по сравнению с продольной волной скоростью. В зависимости от свойства материала на фронте продольные волны все параметры движения, кроме касательной к рассматриваемой точке нити, претерпевают сильные или слабые разрывы, а на фронте поперечной волны – относительная деформация нити остается неразрывной. Приведены методы определения уравнения характеристических кривых гиперболических уравнений и, дифференциальных условий, имеющих место на этих кривых, а также выражения для оценки коэффициентов скачка параметров движения при переходе фронтов продольных и поперечных волн.Методы определения уравнения характеристических кривых гиперболических уравнений и, дифференциальных условий, имеющих место на этих кривых, а также выражения для оценки коэффициентов скачка параметров движения при переходе фронтов продольных и поперечных волн, изложенные в [2, 3] несколько отличается от метода, изложенного в [1]. Методика определения выражения для качественной оценки коэффициентов скачка параметров движения при переходе фронтов продольных и поперечных волн, предложенная в [2, 3] является более удобной по сравнению с методикой, приведенной [1].Методику исследования волновых процессов, возникающих в гибкой нити, предложенную в работах [2, 3], можно рассматривать как развитие метода, предложеного в работе [1]. В работах [2, 3] доказано, что в некоторых нелинйно-упругих материалах под действием динамической нагрузки возникает не поперечная волна в «чистом виде», не несущая разрыва деформации, а продольно-поперечная волна, несущая одновременно всех параметров движения, в том числе и относительной деформации. Определены условия, накладываемые на закон деформирования материала, при которых в нити, под действием динамической нагрузки, возникает поперечная волна в «чистом виде», не несущая разрыва деформации или продольно-поперечная волна, несущая разрыва деформации.Исследования и установления характеристических кривых гиперболических уравнений и дифференциальных условий, имеющих место на этих кривых, а также выражения для оценки коэффициентов скачка параметров движения при переходе фронтов продольных и поперечных волн играют важную роль, прежде всего, в построении алгоритма численно-экспериментальных расчетов теоретических и прикладных задач. Развития исследования свойств волн в различных средах и решения теоретических и прикладных волновых задач, можно найти, например, в работах [8-12]. Дальнейшие исследования, проведенные, например, в работах [13 - 16] показали, что если материал обладает свойством вязкости, то степен присутствие слагаемых, содержащих смещенных частных производственных по времени и координате в дифференциальных уравнениях плоского и пространственного движения нити, возрастает и, отсюда возникают дополнительные требования к навыкам исследователя при применении методов изучении систем гиперболических дифференциальных уравнений, предложенных в работах [2, 3, 6, 7]. Доказано, что под действием динамической нагрузки в нити из вязко-упругого материала, в отличие от линейного материала, всегда возникают продольные и продольно-поперечные волны, т.е. поперечная волна «в чистом виде» в материале, обладающей вязкостью не возникает.

В данной работе предполагается, что натяжение нити является произвольной функцией только скорости относительной деформации. Это позволяет произвести более качественные оценки влияния вязкости материала и смещенных производных по времени и координате на свойства волн и разрывов, а также исследовать поведения таких слагаемых на разрывах. Системно излагается схема определения уравнения характеристических кривых, дифференциальные условия и скачков параметров движения рассматриваемой нити. Особое внимание обращается установлению выражения для оценки влиянию (или не влияния) слагаемых со смещенными производными, содержащихся в правых частях системы гиперболических уравнений, на свойства волн и параметры волнового движения рассматриваемой нити.

Исследования уравнения характеристических кривых, дифференциальных условий, имеющих место на характеристических кривых и скачки параметров движения вязкой нити, проведены по методике, полученной путем комбинации методов, изложенных в работах [1-3].

Работы [12-25] выполнены используя отдельных положений предлагаемой здесь методики и выводов.

1°. ***Преобразования дифференциальных уравнений пространственного движения нелинейно-вязкой нити***. Будем рассматривать систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственного движения [1–3, 12, 18]

$$\left.\begin{array}{c} \rho_0\, x^{\bullet\bullet} = \left[\sigma^*\,\varsigma\,(1+x')\right]' + P_1^*(s,t), \qquad \rho_0\, y^{\bullet\bullet} = \left[\sigma^*\,\varsigma\,y'\right]' + P_2^*(s,t), \\ \rho_0\, z^{\bullet\bullet} = \left[\sigma^*\,\varsigma\,z'\right]' + P_3^*(s,t), \qquad \sigma^* = \sigma^*\left(\varepsilon^{\bullet}\right), \\ \cos\alpha = (1+x')\varsigma, \quad \cos\beta = y'\varsigma, \quad (1+\varepsilon)\cos\gamma = z'\varsigma . \end{array}\right\} \qquad (1)$$

и закона деформирования материала гибкой нити

$$\sigma^* = \sigma^*\left(\varepsilon^\bullet\right), \qquad (1a)$$

где: t – время; s – лагранжева координата; $x(s,t)$, $y(s,t)$, $z(s,t)$ – координаты рассматриваемой точки нити в декартовой системе координат (x,y,z); $\sigma^* = \sigma^*(s,t)$ – натяжение; $\varepsilon(s,t)$ – относительная деформация; $P_1^*(s,t)$, $P_2^*(s,t)$, $P_3^*(s,t)$ – составляющие массовой силы $P = P(s,t)$ на оси x, y, z соответственно; $\alpha(s,t)$, $\beta(s,t)$, $\gamma(s,t)$ – углы, образованные между касательной к данной точке нити и осями координат x, y, z; ρ_0 – начальная плотность недеформированной нити.

Здесь и в дальнейшем;

$$(\cdot)' = \frac{\partial(\cdot)}{\partial s}; \quad d_T(\cdot) = \frac{d(\cdot)}{d\,t}; \quad \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} = (\cdot)^\bullet; \quad P_i(s,t) = \frac{P_i^*(s,t)}{\rho_0};$$

$$\varsigma = \frac{1}{1+\varepsilon}; \quad \sigma = \frac{\sigma^*}{\rho_0}; \quad c^2 = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon_t}.$$

Последние три выражения системы (1), возникают вследствие того, что касательный проведенный к каждой точке гибкой нити, может принимать произвольное направление в пространстве движения в зависимости от условия действия внешней нагрузки. Данные выражения интегрируются только совместно с основными дифференциальными уравнениями, т.е. являются неголономными уравнениями связи, характеризующими геометрических положений частиц нити в области исследования.

Выражение (1 a) предполагает, что материал нити является произвольной функцией скорости деформации.

Из последних равенств системы (1), найдем

$$\left.\begin{aligned} (1+\varepsilon)^2 &= (1+x')^2 + (y')^2 + (z')^2, \\ (1+\varepsilon)\,(1+\varepsilon)' &= (1+x')x'' + y'y'' + z'z''. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Раскрывая скобки, подставляя выражение $\sigma' = c^2\varepsilon'^\bullet$ и учитывая условия (2), основные дифференциальные уравнения системы (1), приводим к виду

$$\left.\begin{aligned} x^{\bullet\bullet} &= \xi_{11}x''' + \xi_{12}y'' + \xi_{13}z'' + c^2\,(1+x')\varepsilon'^\bullet\ \ \varsigma + P_1(s,t), \\ y^{\bullet\bullet} &= \xi_{21}x'' + \xi_{22}y'' + \xi_{23}z'' + c^2\,y'\,\varepsilon'^\bullet\ \ \varsigma + P_2(s,t), \\ z^{\bullet\bullet} &= \xi_{31}x'' + \xi_{32}y'' + \xi_{33}z'' + c^2\,z'\,\varepsilon'^\bullet\ \ \varsigma + P_3(s,t) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где

$$\xi_{11} = \xi_{151}(1+x')^2 + \chi_{151}, \quad \xi_{12} = \xi_{21} = \xi_{151}\,(1+x')y', \quad \xi_{22} = \xi_{151}\,(y')^2 + \chi_{151},$$

$$\xi_{13} = \varepsilon_{31} = \xi_{151}(1+x')z', \quad \xi_{23} = \xi_{32} = \xi_{151}y'z', \quad \xi_{33} = \xi_{151}\,(z')^2 + \chi_{151},$$

$$\xi_{151} = \{(1+\varepsilon)\sigma_E - \sigma\}\,\varsigma^3, \quad \chi_{151} = \sigma\ \ \varsigma.$$

В слагаемые правых частей уравнения системы (3) входят линейные и нелинейные смещенные производные второго и третьего порядка перемещения и их перемножения.

2°. *Определение характеристики дифференциальных уравнений*. Поступая как в работах [1, 12-16], к рассматриваемой системе присоединим следующие дифференциальные соотношения

$$\left.\begin{aligned} d\left(x^{\bullet}\right)-k\,d\left(x'\right)&=\left[f_1(s,t)+c^2\varsigma\,(1+x')\varepsilon'^{\bullet}+P_1(s,t)\right]dt,\\ d\left(y^{\bullet}\right)-k\,d\left(y'\right)&=\left[f_2(s,t)+c^2\varsigma\,y'\varepsilon'^{\bullet}+P_2(s,t)\right]dt,\\ d\left(z^{\bullet}\right)-k\,d\left(z'\right)&=\left[f_3(s,t)+c^2\varsigma\,z'\varepsilon'^{\bullet}+P_3(s,t)\right]dt.\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где: $f_j(s,t)$ – неизвестные пока функции, $j=1,2,3$; $k=d_T s$ – угловой коэффициент касательной к характеристической кривой $w(s,t)=0$; $j=1,2,3$.

Из соотношения (4), находим

$$\left.\begin{aligned} x^{\bullet\bullet}&=k^2x''+c^2\varsigma\,(1+x')\varepsilon'^{\bullet}+f_1(s,t)+P_1(s,t),\\ y^{\bullet\bullet}&=k^2y''+c^2\varsigma\,y'\varepsilon'^{\bullet}+f_2(s,t)+P_2(s,t),\\ z^{\bullet\bullet}&=k^2z''+c^2\varsigma\,z'\varepsilon'^{\bullet}+f_3(s,t)+P_3(s,t).\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Подставляя соотношения (5) в дифференциальные уравнения (3), будем иметь

$$\left.\begin{aligned} \left(\xi_{11}-k^2\right)x''+\xi_{12}y''+\xi_{13}z''&=f_1(s,t),\\ \xi_{21}x''+\left(\xi_{22}-k^2\right)y''+\xi_{23}z''&=f_2(s,t),\\ \xi_{31}x''+\xi_{32}y''+\left(\xi_{33}-k^2\right)z''&=f_3(s,t).\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

На характеристической кривой $w(s,t)=0$ вторые производные x'', y'' и z'' имеют не единственные значения. Основной определитель системы (6) равен нулю и уравнения последней системы является линейно зависимыми. Умножим второе и третье уравнения системы (6) на неизвестные пока коэффициенты λ и μ соответственно и рассмотрим сумму всех уравнений данной системы

$$\left.\begin{aligned} &\left(\xi_{11}-k^2+\lambda\xi_{21}+\mu\xi_{31}\right)x''+\left[\xi_{12}+\lambda\left(\xi_{22}-k^2\right)+\mu\xi_{32}\right]y''+\\ &+\left[\xi_{13}+\lambda\xi_{23}+\mu\left(\xi_{33}-k^2\right)\right]z''=f_1(s,t)+\lambda\,f_2(s,t)+\mu\,f_3(s,t)\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Далее, потребуем, чтобы коэффициенты при производных x'' и z'' были равны нулю (так как λ и μ – произвольные коэффициенты). В результате получаем следующую систему

$$\left.\begin{aligned} \xi_{11}-k^2+\lambda\xi_{21}+\mu\xi_{31}&=0,\\ \xi_{12}+\lambda\left(\xi_{22}-k^2\right)+\mu\xi_{32}&=0,\\ \xi_{13}+\lambda\xi_{23}+\mu\left(\xi_{33}-k^2\right)&=0,\\ f_1(s,t)+\lambda\,f_2(s,t)+\mu\,f_3(s,t)&=0\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Исключая коэффициенты ξ_{ij}, λ и μ, из уравнения (8), найдем

$$k_{3,4}=\left(d_T s\right)_{3,4}=\pm\sqrt{\sigma\varsigma}\,. \tag{9}$$

$$\lambda_2(k_{3,4}) = -\frac{(z')^2 + (1+x')^2}{(1+x')y'}; \qquad \mu_2(k_{3,4}) = \frac{z'}{1+x'}. \qquad (10)$$

Отсюда следует, что под действием динамической нагрузки в вязкой нити возникает только одна волна, распространяющаяся в стороны роста и убывания параметра s со скоростями $\pm\sqrt{\sigma\varsigma}$. Для сравнения отметим, что в упругой и вязко упругой нити возникают двух типов волн, распространяющиеся со скоростями $\pm\sqrt{\sigma_E}$ и $\pm\sqrt{\sigma\varsigma}$.

3°. *Найдем дифференциальные условия*, имеющие места на характеристических кривых. Второй и третьей равенства системы (4) умножим на λ, μ соответственно и рассмотрим сумму первого и третьего уравнения

$$d(x^\bullet) + \lambda\, d(y^\bullet) + \mu\, d(z^\bullet) - k[d(x') + \lambda\, d(y') + \mu\, d(z')] =$$
$$= c^2(1+\varepsilon)^{-1}[1 + x' + \lambda y' + \mu z']\varepsilon'^\bullet\, dt +$$
$$+ [f_1(s,t) + \lambda f_2(s,t) + \mu f_3(s,t)]\, dt + [P_1(s,t) + \lambda P_2(s,t) + \mu P_3(s,t)]\, dt. \qquad (11)$$

Путем подстановки соответствующие выражения λ_2, μ_2 и $k_{3,4}$ можно убедиться, что

$$1 + x' + \lambda_2 y' + \mu z' = 0. \qquad (12)$$

Таким образом, дифференциальные условия (11) принимают следующий окончательный вид:

$$d(x^\bullet) + \lambda_2\, d(y^\bullet) + \mu\, d(z^\bullet) \mp \sqrt{\sigma\varsigma}[d(x') + \lambda_2\, d(y') + \mu\, d(z')] =$$
$$= [P_1(s,t) + \lambda_2 P_2(s,t) + \mu P_3(s,t)]\, dt. \qquad (13)$$

Видно, что дифференциальные условия от скачка производной $\varepsilon'^\bullet$ не зависит.

4°. *Найдем разрывы, имеющие места на характеристических кривых.* Найдем значения разрыва смешенной производной $\varepsilon'^\bullet$ относительной деформации на фронте рассматриваемой волны. Применив операцию скачок [...], умножив второе и третье уравнения на λ_2, μ_2 соответственно и складывая все три уравнения системы (4) получаем $0\cdot[\varepsilon'^\bullet]dt = 0$. Отсюда следует, что на фронте рассматриваемой волны $k_{3,4}$ скачок производной $\varepsilon'^\bullet$ принимает произвольные значения.

Уравнения (6) на фронте данного разрыва принимают вид

$$\left.\begin{aligned} &(\xi_{11} - k_{3,4}^2)[x''] + \xi_{12}[y''] + \xi_{13}[z''] = [f_1(s,t)], \\ &\xi_{21}[x''] + (\xi_{22} - k_{3,4}^2)[y''] + \xi_{23}[z''] = [f_2(s,t)], \\ &\xi_{31}[x''] + \xi_{32}[y''] + (\xi_{33} - k_{3,4}^2)[z''] = [f_3(s,t)] \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Отсюда видно, что разрывы $[f_j(s,t)]$ имеют не единственные значения, так как на характеристической кривой $w(s,t) = 0$ вторые производные x'', y'' и z'' имеют не единственные значения.

Пусть $[f_j(s,t)]\cdot[\varepsilon'^\bullet] \neq 0$. Применим к уравнениям (5) операцию скачок

$$[f_1(s,t)] = [x^{\bullet\bullet}] - k_{3,4}^2[x''] - c^2(1+x')\varsigma[\varepsilon'^{\bullet}],$$
$$[f_2(s,t)] = [y^{\bullet\bullet}] - k_{3,4}^2[y''] - c^2 y'\varsigma[\varepsilon'^{\bullet}],$$
$$[f_3(s,t)] = [z^{\bullet\bullet}] - k_{3,4}^2[z''] - c^2 z'\varsigma[\varepsilon'^{\bullet}].$$

Подставляя последние соотношения в уравнения (14) будем иметь

$$\left.\begin{aligned}
[x''] &= \delta_{11}[x^{\bullet\bullet}] + \delta_{12}[y^{\bullet\bullet}] + \delta_{13}[z^{\bullet\bullet}] + \delta_{14}[\varepsilon'^{\bullet}],\\
[y''] &= \delta_{21}[x^{\bullet\bullet}] + \delta_{22}[y^{\bullet\bullet}] + \delta_{23}[z^{\bullet\bullet}] + \delta_{24}[\varepsilon'^{\bullet}],\\
[z''] &= \delta_{31}[x^{\bullet\bullet}] + \delta_{32}[y^{\bullet\bullet}] + \delta_{33}[z^{\bullet\bullet}] + \delta_{34}[\varepsilon'^{\bullet}]
\end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

где

$$\delta_{11} = \nabla_1\{\xi_{22}(\xi_{13}\xi_{32} - \xi_{33}\xi_{12}) - \xi_{32}(\xi_{13}\xi_{22} - \xi_{23}\xi_{12})\}, \quad \delta_{12} = -\nabla_1\xi_{12}(\xi_{13}\xi_{32} - \xi_{33}\xi_{12}),$$
$$\delta_{14} = -c^2\nabla_1\varsigma\{(\xi_{22}(1+x') - \xi_{12}y')(\xi_{13}\xi_{32} - \xi_{33}\xi_{12}) -$$
$$-(\xi_{32}(1+x') - \xi_{12}z')(\xi_{13}\xi_{22} - \xi_{23}\xi_{12})\}, \quad \delta_{13} = \nabla_1\xi_{12}(\xi_{13}\xi_{22} - \xi_{23}\xi_{12}),$$
$$\delta_{21} = \nabla_2\{\xi_{21}(\xi_{13}\xi_{31} - \xi_{33}\xi_{11}) - \xi_{31}(\xi_{13}\xi_{21} - \xi_{23}\xi_{11})\}, \quad \delta_{22} = -\nabla_2\xi_{11}(\xi_{13}\xi_{31} - \xi_{33}\xi_{11}),$$
$$\delta_{24} = -c^2\nabla_2(1+\varepsilon)^{-1}\{(\xi_{21}(1+x') - \xi_{11}y')(\xi_{13}\xi_{31} - \xi_{33}\xi_{11}) -$$
$$-(\xi_{31}(1+x') - \xi_{11}z')(\xi_{13}\xi_{21} - \xi_{23}\xi_{11})\}, \quad \delta_{23} = \nabla_2\xi_{11}(\xi_{13}\xi_{21} - \xi_{23}\xi_{11}),$$
$$\delta_{31} = \nabla_3\{\xi_{21}(\xi_{12}\xi_{31} - \xi_{32}\xi_{11}) - \xi_{31}(\xi_{12}\xi_{21} - \xi_{22}\xi_{11})\}, \quad \delta_{32} = -\nabla_3\xi_{11}(\xi_{12}\xi_{31} - \xi_{32}\xi_{11}),$$
$$\delta_{34} = -c^2\nabla_3(+\varepsilon)^{-1}\{(\xi_{21}(1+x') - \xi_{11}y')(\xi_{12}\xi_{31} - \xi_{32}\xi_{11}) -$$
$$-(\xi_{31}(1+x') - \xi_{11}z')(\xi_{12}\xi_{21} - \xi_{22}\xi_{11})\}, \quad \delta_{33} = \nabla_3\xi_{11}(\xi_{12}\xi_{21} - \xi_{22}\xi_{11}),$$
$$\nabla_1 = \{(\xi_{11}\xi_{22} - \xi_{12}\xi_{21})(\xi_{13}\xi_{32} - \xi_{33}\xi_{12}) - (\xi_{11}\xi_{32} - \xi_{31}\xi_{12})(\xi_{13}\xi_{22} - \xi_{23}\xi_{12})\}^{-1},$$
$$\nabla_2 = \{(\xi_{12}\xi_{21} - \xi_{22}\xi_{11})(\xi_{13}\xi_{31} - \xi_{33}\xi_{11}) - (\xi_{12}\xi_{31} - \xi_{22}\xi_{11})(\xi_{13}\xi_{21} - \xi_{23}\xi_{11})\}^{-1},$$
$$\nabla_3 = \{(\xi_{13}\xi_{21} - \xi_{23}\xi_{11})(\xi_{12}\xi_{31} - \xi_{32}\xi_{11}) - (\xi_{13}\xi_{31} - \xi_{33}\xi_{11})(\xi_{12}\xi_{21} - \xi_{22}\xi_{11})\}^{-1}.$$

Уравнения (15) устанавливает связи между коэффициентами скачка составляющих ускорения и вторых производных перемещения по координате s.

Найдем разрывы производной относительной деформации. Подставляя в уравнения (15) соотношение (2), будем иметь

$$(1+\varepsilon)[\varepsilon'] = \{(1+x')\delta_{11} + y'\delta_{21} + z'\delta_{31}\}[x^{\bullet\bullet}] + \{(1+x')\delta_{12} + y'\delta_{22} + z'\delta_{32}\}[y^{\bullet\bullet}] +$$
$$+\{(1+x')\delta_{13} + y'\delta_{23} + z'\delta_{33}\}[z^{\bullet\bullet}] + \{(1+x')\delta_{14} + y'\delta_{24} + z'\delta_{34}\}[\varepsilon'^{\bullet}].$$

Не трудно проверить, что коэффициенты при вторых производных последнего уравнения отличны от нуля. Таким образом, производная относительной деформации по координате s имеет отличные от нуля разрывы. При отсутствии вязкости на фронте волны $\kappa_{3,4}$ первые производные относительной деформации и натяжение не имеют разрывы [1–6].

Таким образом, на фронте волны $\kappa_{3,4}$ функция $\varepsilon'^{\bullet}$ имеет разрывы и все параметры, которые здесь подвергаются исследованию, терпят разрывы. Такая волна, в случае упругой нити называется продольно-поперечной волной [2, 3].

Выводы

1. Построена схема определения свойства волн, возникающих в нелинейно-вязкой нити, уравнения характеристических кривых, дифференциальные, условия, имеющие место на характеристических кривых, коэффициентов скачка параметров при переходе частиц нити фронтов разрывов.
2. Доказано, что под действием динамической нагрузки в нелинейно-вязкой нити возникают только продольно-поперечные волны, распространяющиеся в стороны роста и убывания параметра s со скоростями $\pm\sqrt{\sigma\varsigma}$.
3. Установлено, что скачки дифференциальных условий, имеющих место на фронтах продольно-поперечных волн от скачка смещенной производной $\varepsilon'^{\bullet}$ относительной деформации, не зависят.

Использованная литература

1. Рахматулин Х.А., Демянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Физматгиз, 1961.
2. Павленко А.Л. Обобщение теории поперечного удара по гибкой нити// Изв. АН РФ. ОТН. 1960. Вып. 2.
3. Павленко А.Л. О распространении разрывов в гибкой нити// Изв. АН РФ. ОТН. Механика и машиностроение. 1959. № 4.
4. Кристеску Н. К распространению волн в резине// ПММ. Т. XXI. 1957. Вып. 2.
5. Кристеску Н.К. Распространение волн в гибких нитях (влияние скоростей деформации)// ПММ. Т. 21. 1957. Вып. 4.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.
7. Годунов С.К. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.
8. Новацкий В.К. Волновые задачи теории пластичности. М.: Мир, 1978.
9. Сагомонян А.Я. Воны напряжения в сплошных средах. М.: МГУ. 1985.
10. Крауфорд. Волны. Т.3. М.: Наука, 1984.
11. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Наука. 1977.
12. Волны Рахматулина в нитях и стержнях. Под ред. Х.А.Алимовой, М.Т.Мамасаидова, К.Жуманиязова, М.Эргашова. Ташкент. Фан, 2000.
13. Эргашов М. Исследование процессов распространения упругих волн в намоточных связях при учете эффектов их вращения при растяжении// ПММ. Т. 56. 1992. Вып. 1. (Пер. на анг. язык: Ergashov M. A study of the propagation of elastic waves in wend structures taking into account their rotation under extension. J. Appl. Maths. Mesh. Vol. 56. 1992. No. 1. Printed in Great Britain).
14. Эргашов М., Мардонов Б. Исследование дифференциальных уравнений пространственного движения нити// Проблемы механики. 1994. № 2.
15. Эргашов М. Теория распространения волн в намоточных связях. Тошкент. Фан, 2001.
16. Бараев А. Вопросы теории распространения нелинейных волн в нитях и стержнях. Алматы. Наш Мир, 2006.
17. Эргашов М. Исследование деформаций, возникающих при поперечном ударе прямоугольным брусом по нити. Изв. АН РФ. МТТ. 1987. №1.
18. Эргашов М. Свойства и взамодействия волн в нити. Т.: Фан, 2001.
19. Эргашов М. Вопросы соударения нити с твердыми телами. Т.: Фан, 2001.

20. Эргашов М., Ахунбабаев О.А. Методы расчета натяжения нелинейных нитей основы взаимодействующих с рабочими органами модернизированного шелкоткацкого станка. Т.: Fan va texnologiya. 2016.
21. Эргашов М. Поперечный удар прямоугольным брусом по гибкой нити. Изв. АН РФ. МТТ. 1991. № 5.
22. Эргашов М., Саидова Р.А. Поперечный удар прямоугольным брусом, движущимся со скачкообразно меняющейся скоростью по нити. Прикладная механика. Т.: 33. № 10. 1997.
23. Эргашов М., Саидова Р.А. Удар клином по гибкой нити. Изв. АН. РФ. МТТ. . 1998. № 6.
24. Эргашов М., Мавлонов М.Т.Скольжение нити по поверхности твердого тела. Прикладная механика. Т.: 38. № 7. 2002.
25. Эргашов М., О.А.Ахунбабаев. Теория расчета натяжения нити основы в шелкоткацких станках. Т.: “Fan va texnologiya”, 2010.