



ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-3-269-279

УДК 539.3

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Исследование волн в подкрепленной сети

Д.Г. Агаларов , Г.А. Мамедова  , М.А. Рустамова 

Институт математики и механики Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджанская Республика

 gular-gulshan@rambler.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 20 апрель 2022 г.

Доработана: 10 июня 2022 г.

Принята к публикации: 12 июня 2022 г.

Для цитирования

Агаларов Д.Г., Мамедова Г.А., Рустамова М.А. Исследование волн в подкрепленной сети // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 3. С. 269–279. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-269-279>

Аннотация. Рассматриваются движения подкрепленной сети. Сетчатые системы используются в различных областях современной техники, авиации, рыболовстве, строительстве. За последние годы большое внимание привлекали полные уравнения, которые описывают движение деформируемой нити. В соответствии с поставленной задачей подкрепление сети осуществляется добавлением членов в уравнения движения. В плоском случае изучается статическое поведение конструкции и выводятся уравнения, позволяющие исследование движения. Задача распространения волн в деформируемых нитевых системах с учетом значительного отклонения формы нитей от первоначального прямолинейного в математическом отношении весьма сложна, так как уравнения движения представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Для ее решения используется метод характеристик. Им же решается задача о распространении волн разгрузки (в случае нагрузки возникают ударные волны). В зависимости от распределения скорости на границе определяется распределение деформации постоянной на характеристиках. Результаты строятся численным интегрированием интегралов, найденных методом характеристик. Решение с помощью уравнений характеристик показывает возникновение бегущих волн.

Ключевые слова: сеть, скорость волны, метод характеристик, деформация, напряжение

Агаларов Джафар Гасанага, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел волновой динамики, Институт математики и механики, Национальная академия наук Азербайджана, Азербайджанская Республика, AZ1141, Баку, ул. Б. Вахабадзе, д. 9; ORCID: 0000-0002-4875-8246.

Мамедова Гюльдаста Акиф, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел волновой динамики, Институт математики и механики, Национальная академия наук Азербайджана, Азербайджанская Республика, AZ1141, Баку, ул. Б. Вахабадзе, д. 9; ORCID: 0000-0002-7753-1593, Scopus ID: 57226500009, eLIBRARY SPIN-код: 2937-6621; gular-gulshan@rambler.ru

Рустамова Мехсети Акиф кызы, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, доцент отдела волновой динамики, Институт математики и механики, Национальная академия наук Азербайджана, Азербайджанская Республика, AZ1141, Баку, ул. Б. Вахабадзе, д. 9; ORCID: 0000-0001-5192-1166, Scopus ID: 55489058000, eLIBRARY SPIN-код: 2290-2409; mehsetir@gmail.com

© Агаларов Д.Г., Мамедова Г.А., Рустамова М.А., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Investigation of waves in the strengthened net

Jafar H. Agalarov , Guldasta Akif Mammadova ✉, Mexseti Akif Rustamova 

Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan Republic

✉ gular-gulshan@rambler.ru

Article history

Received: April 20, 2022

Revised: June 10, 2022

Accepted: June 12, 2022

For citation

Agalarov J.H., Mammadova G.A., Rustamova M.A. Investigation of waves in the strengthened net. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(3):269–279. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-269-279>

Abstract. The movements of a reinforced net are considered. Mesh systems are used in various areas of modern technology, aviation, fishing, and construction. In recent years, much attention has been drawn to the complete equations that describe the motion of a deformable thread. In accordance with the studied task, the reinforcement of the net is carried out by adding terms in the equations of motion. In the planar case, the static behavior of the structure is investigated, and equations of motion are derived that allow the study of motion. The problem of wave propagation in deformable filament systems, taking into account a significant deviation of the filament shape from the original rectilinear one, is mathematically very difficult, since the equations of motion are a system of nonlinear differential equations in partial derivatives. To solve the problem, the method of characteristics is used. As well the method of characteristics solves the problem of the propagation of unloading waves (in the case of a load, shock waves arise). Depending on the velocity distribution at the boundary, the distribution of the strain constant on the characteristics is determined. The results are constructed by numerical integration of the integrals of the characteristics found by the method. The solution using the characteristic equations shows the occurrence of traveling waves.

Keywords: net, wave velocity, characteristics method, deformation, stress

Введение

В [1] на основе уравнений движения сети в общем случае строятся уравнения движения цилиндрической сети. Определяются варианты распространения волн в случае основы сети из упругих волокон. Методом характеристик решена и проиллюстрирована расчетами задача о распространении волн разгрузки в предварительно натянутой сети.

На основе механики сетей [2–10] рассматриваются уравнения движения сети с дополнительными членами, которые соответствуют сопротивлению относительной поворота ветвей сети. Задача о распространении волн в случае плоской сети также решена методом характеристик и проиллюстрирована расчетами.

В последние годы большое внимание привлекали полные уравнения, которые описывают движение деформируемой нити при больших прогибах. Частично этот интерес обусловлен техническими приложениями физических явлений, описываемых этими уравнениями. Например, в [11] рассмотрена задача о поперечном ударе, имеющая точные решения типа простых волн, и показано, что данные уравнения обеспечивают фундаментальную теоретическую основу для проведения экспериментальных исследований поведения материалов при больших динамических деформациях и высоких скоростях деформирования.

В [12] рассмотрена задача о поперечном ударе по гибкой нити столь тупым клином, что его щеки оказывают влияние на характер движения нити. Особенность предложенной схемы решения поставлен-

Jafar Hasanaga Agalarov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, chief researcher, Department of Wave Dynamics, Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, 9 B. Vahabzade St, Baku, AZ1141, Azerbaijan Republic; ORCID: 0000-0002-4875-8246.

Guldasta Akif Mammadova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, leading researcher, Department of Wave Dynamics, Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, 9 B. Vahabzade St, Baku, AZ1141, Azerbaijan Republic; ORCID: 0000-0002-7753-1593, Scopus ID: 57226500009, eLIBRARY SPIN-code: 2937-6621; gular-gulshan@rambler.ru

Mexseti Akif Rustamova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Associate Professor of the Department of Wave Dynamics, Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, 9 B. Vahabzade St, Baku, AZ1141, Azerbaijan Republic; ORCID: 0000-0001-5192-1166, Scopus ID: 55489058000, Web of Science Researcher ID: AAE-2689-2019, eLIBRARY SPIN-code: 2290-2409; mehsetir@gmail.com

ной задачи заключается в том, что вводятся сосредоточенные силы в точках излома; предполагается, что в области поперечных движений нить прилегает к щеке клина.

В [13; 14] исследовалась динамика пространственных форм гибких связей. Первыми были рассмотрены задачи об ударе гладким конусом по нити [14] и решены автомодельные задачи. В [13] найден класс частных решений уравнений движения нити на поверхности абсолютно гладкого конуса.

Теория сети построена на основе нити Х.А. Рахматулина [15]. На основе предложенной теории сети рассмотрен ряд задач, в том числе для плоских и пространственных конструкций. Также рассмотрены задачи для цилиндрических конструкций. Гибкие бурильные трубы могут рассматриваться как подкрепленная сеть.

В [16] рассматривается некоторая континуальная система (напряжения, деформации, перемещения описываются функциями непрерывно меняющихся аргументов). Такой подход к исследованию сетчатых систем позволил эффективно использовать методы механики деформируемого твердого тела и аппарат уравнений математической физики [17–19].

В настоящее время известны сетевые и вантовые структуры. В частности, в качестве примера можно привести рыболовные сети [20]. В рассматриваемых задачах сеть рассматривается как изотропная среда. В случае больших деформаций или течения воды будут иметь место значительные отклонения расчетов от реальных состояний.

Для статических задач это применимо. В случае движения результаты могут значительно отличаться от реальных, особенно при волновом движении.

Можно сказать то же самое про вантовые сооружения с поддерживаемыми элементами из сетей или тканей, подвергающихся ветровым нагрузкам.

Построенная на основе теории нити Х.А. Рахматулина [1] теория сети [2] расширяется в случае среды, сопротивляющейся сдвигу, путем присоединения к предыдущим уравнениям дополнительных членов. Данная теория может быть применена к тканям различной конструкции.

К сетевым системам можно также отнести вантовые системы. Ветровые нагрузки дадут отклонения при расчетах для тканой сети.

Цель работы состоит в исследовании волн в подкрепленной плоской сети.

Постановка и решение задачи

Уравнения сети впервые были приведены в [1]. Уравнение движения сети, построенной на основе теории Х.А. Рахматулина, с учетом сопротивления относительно поворота элементов сети будут иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_1 \bar{\tau}_1) + \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_2 \bar{\tau}_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_2 \bar{\tau}_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_1 \bar{\tau}_1) = (\rho_1 + \rho_2) \frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где t – время; ρ_1 – плотность сети; ρ_2 – плотность подкрепления; α – коэффициент усилия сопротивления относительно поворота элементов в различных направлениях.

Получим замкнутую систему уравнений движения, дополняя кинематические соотношения

$$(1 + e_1) \bar{\tau}_1 = \frac{\partial \bar{r}}{\partial s_1}, \quad (2)$$

$$(1 + e_2) \bar{\tau}_2 = \frac{\partial \bar{r}}{\partial s_2}, \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 – напряжения волокон в направлениях $\bar{\tau}_1$ и $\bar{\tau}_2$; $\bar{\tau}_1$, $\bar{\tau}_2$ – единичные векторы касательные к нитям; e_1 и e_2 – относительные удлинения соответствующих нитей; \bar{r} – радиус-вектор частицы сети; γ_1 , γ_2 – углы нитей, образованные осью сети; s_1 и s_2 – лагранжевы координаты частиц нитей.

Уравнения плоской сети будут иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_1 \cos \gamma_1) + \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_2 \sin \gamma_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_2 \sin \gamma_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_1 \cos \gamma_1) = (\rho_1 + \rho_2) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_1 \sin \gamma_1) + \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_2 \cos \gamma_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_1}(\sigma_2 \cos \gamma_2) + \alpha \frac{\partial}{\partial s_2}(\sigma_1 \sin \gamma_1) = (\rho_1 + \rho_2) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$(1 + e_1) \cos \gamma_1 = 1 + \frac{\partial u}{\partial s_1}, \quad (6)$$

$$(1 + e_2) \sin \gamma_2 = \frac{\partial u}{\partial s_2}, \quad (7)$$

$$(1 + e_1) \sin \gamma_1 = \frac{\partial y}{\partial s_1}, \quad (8)$$

$$(1 + e_2) \cos \gamma_2 = \frac{\partial y}{\partial s_2} + 1. \quad (9)$$

Для выявления роли подкрепления на деформирование сети рассмотрим случай статического растяжения полосы (рис. 1). Сеть равного наклона ветвей к координатам под действием цели P .

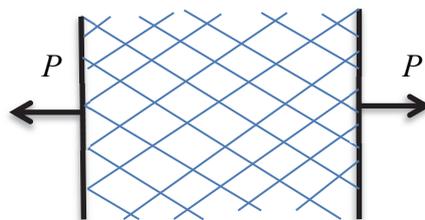


Рис. 1. Подкрепленные сети
Figure 1. Fortified net

Далее рассматривается симметричное расположение правых и левых волокон. Тогда уравнения (4)–(9), учитывая

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma, \quad s_1 = s_2 = s,$$

примут вид

$$\sigma(\cos \gamma + \sin \gamma) = \frac{P}{1 + \alpha}, \quad (10)$$

$$(1 + e)(\cos \gamma - \sin \gamma) = 1. \quad (11)$$

Из (10) видно, что часть нагрузки берет на себя подкрепление $\frac{P}{1 + \alpha}$.

Если возвести в квадрат выражения (10) и (11) и сложить их рядом, получим

$$\frac{P^2}{(1 + \alpha)^2 \sigma^2} + \frac{1}{(1 + e)^2} = 2. \quad (12)$$

Откуда можно определить деформацию и из (11) угол поворота.

Уравнение движение

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{\rho + \rho_1}{1 + \alpha} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Рассмотрим плоское движение сети. Ось u располагается в диагональном направлении. Уравнение (4) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial s} (\sigma(\cos \gamma + \sin \gamma)) = \frac{\rho + \rho_1}{1 + \alpha} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Уравнения (6) и (7) будут иметь вид

$$\cos \gamma = \frac{1 + \frac{\partial u}{\partial s}}{1 + e}, \quad (14)$$

$$\sin \gamma = \frac{\frac{\partial u}{\partial s}}{1 + e}. \quad (15)$$

Подставив в (13), получим

$$\frac{\sigma}{1 + e} \left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right) = \frac{\rho + \rho_1}{1 + \alpha} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

или

$$\left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right) \frac{\partial}{\partial s} \frac{\sigma}{1 + e} + \frac{2\sigma}{1 + e} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{\rho + \rho_1}{1 + \alpha} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (16)$$

Из (14) и (15)

$$e = \sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2} - 1, \quad (17)$$

откуда

$$\frac{\partial e}{\partial s} = \frac{\left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial s^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}}. \quad (18)$$

Предполагая, что материал сети линейно упругий, то есть $\sigma = Ee$, имеем:

$$E \frac{\partial}{\partial s} \frac{e}{1 + e} = \frac{E}{(1 + e)^2} \cdot \frac{\partial e}{\partial s}, \quad (19)$$

а также

$$\frac{Ee}{1+e} = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2} - 1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}} E. \quad (20)$$

Подставив (17) и (18) в (19), получим

$$E \frac{\partial}{\partial s} \frac{e}{1+e} = \frac{E \left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial s^2}}{\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (21)$$

Подставив (21) и (20) в (16), получим

$$\frac{\left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 E}{\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + 2E \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2} - 1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{1 + \alpha} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}} \left[\frac{\left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2} - 2 \right] + 2 \right\} \frac{1 + \alpha}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} E = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Рассмотрим величину

$$a^2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}} \left[\frac{\left(1 + 2 \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2}{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)^2} - 2 \right] + 2 \right\} \frac{1 + \alpha}{\rho_1 + \rho_2} E.$$

С увеличением $\frac{\partial u}{\partial s}$ a увеличивается.

Уравнения движения сети представим в виде

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (22)$$

Поскольку с ростом $\frac{\partial u}{\partial s}$ a растет, скорость волн увеличивается, и в задаче о движении полубесконечной сети при нагружении неподвижной сети с одного края будет возникать ударная волна.

При разгрузке предварительно растянутой сети будут возникать непрерывные волны.

Исследуем этот случай. Введем метод характеристик. Пусть сеть находится в растянутом состоянии e_0 .

На границе сеть разгружается со скоростью $\xi(t)$. Характеристики уравнения (22) имеют вид

$$ds = a dt, \tag{23}$$

$$ds = -a dt. \tag{24}$$

Условия на характеристиках

$$du_t = a du_s \tag{25}$$

и

$$du_t = -a du_s, \tag{26}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial s} = u_s, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = u_t \right),$$

$$u_t - \xi_0 = \int_{u_s^0}^{u_s} a du_s, \tag{27}$$

$$u_t - 0 = - \int_e^{u_s} a du_s. \tag{28}$$

Фронт волны разгрузки движется со скоростью $a(e_0)$. В части DOA (рис. 2.) состояние покоя.

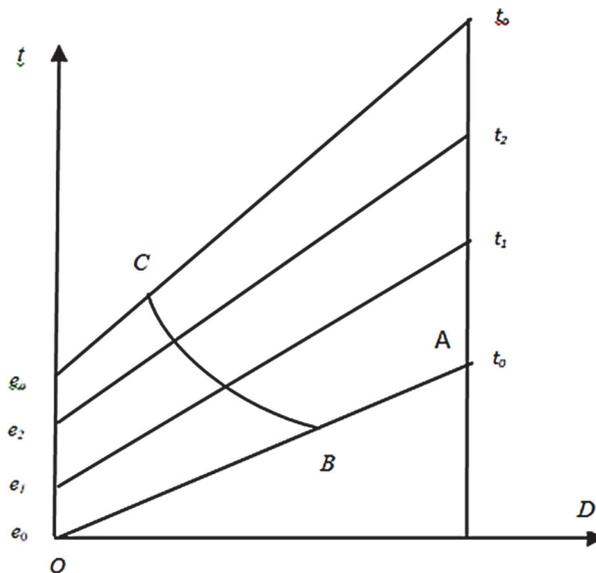


Рис. 2. Описание скорости волны
Figure 2. Description of wave speed

Из условия на отрицательной характеристике ВС следует $u_t = -\int_{u_s^0}^{u_s} a du_s$; дифференцируя в направлении положительной характеристики, имеем $du_t = -a du_s$.

Сравнивая с (25), получим $u_t = \text{const}$, $u_s = \text{const}$, то есть на положительных характеристиках u_t и u_s постоянны.

Из (23) имеем

$$u_t = \xi(t - \frac{s}{a}) \quad \text{и} \quad u_s = \eta(t - \frac{s}{a}) + e \tag{29}$$

при $t = \frac{u}{a_0}$, $\xi = 0$, $\eta = e$.

На $u = 0$ выбираем t_0 и определяем ε .

Из (26)

$$du_t = \xi'(dt - \frac{ds}{a} + \frac{s}{a^2} a' du_s), \tag{30}$$

$$du_s = \eta'(dt - \frac{ds}{a} + \frac{s}{a^2} a' du_s). \tag{31}$$

Из (30) и (31)

$$1 + \frac{\eta'}{\xi'} a = 0, \tag{32}$$

$$dt - \frac{ds}{a} + \frac{s}{a^2} a' du_s = 0, \tag{33}$$

Рассмотрим примеры: $\gamma_0 = \frac{\pi}{4}$ и $\gamma_0 = \frac{\pi}{6}$, $e_0 = 0,1$, $a_0 = 5000$ м/с.

График $a(u_s) = a(\varepsilon)$ ($u_s = \varepsilon$), $f(\varepsilon)$ показан на рис. 3.

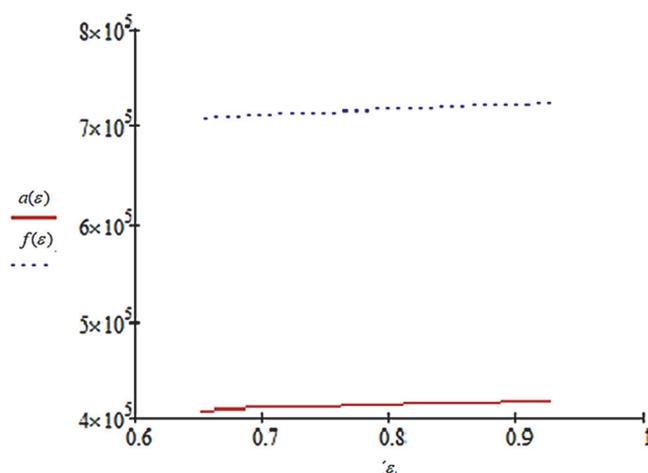


Рис. 3. На границе распределение деформации постоянной на характеристиках
Figure 3. At the boundary, the distribution of deformation constant on the characteristics

Пусть на границе $s = 0$ сеть разгружается со скоростью $\xi(t)$.
Из (26)

$$\xi(t) = - \int_{u_0}^u a(u_s) du_s, \tag{34}$$

где $\xi(t)$ – функция верхнего предела интеграла.

Приближенно представим интеграл (34) в виде суммы

$$\xi(\eta) = \int_0^\eta a(\eta) d\eta, \tag{35}$$

$$\xi_0 = a(\varepsilon_0) \Delta\varepsilon,$$

$$\xi_1 = (a(\varepsilon_0) + a(\varepsilon_1)) \Delta\varepsilon,$$

$$\xi_2 = (a(\varepsilon_0) + a(\varepsilon_1) + a(\varepsilon_2)) \Delta\varepsilon,$$

.....

$$\xi_n = (a(\varepsilon_0) + a(\varepsilon_1) + \dots + a(\varepsilon_n)) \Delta\varepsilon,$$

или

$$\xi = f(\varepsilon),$$

то есть обратную зависимость $\varepsilon \rightarrow \xi$ на границе. Поскольку положительные характеристики прямолинейны, можно определить ε во всей области движения. Функциональная зависимость «скорость движения – скорость волны» для рассмотренного примера представлена в табл. 1 и 2.

Таблица 1 / Table 1

**Функциональная зависимость «скорость движения – скорость волны»,
расчетные значения других используемых параметров, $\rho_1 = 1000$, $\rho_2 = 5000$
Functional dependence of the speed of movement – the speed of the wave,
the calculated values of other parameters used $\rho_1 = 1000$, $\rho_2 = 5000$**

ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}
0,925	0,900	0,875	0,85	0,825	0,800	0,775	0,750	0,725	0,700	0,675
$e(\varepsilon_0)$	$e(\varepsilon_1)$	$e(\varepsilon_2)$	$e(\varepsilon_3)$	$e(\varepsilon_4)$	$e(\varepsilon_5)$	$e(\varepsilon_6)$	$e(\varepsilon_7)$	$e(\varepsilon_8)$	$e(\varepsilon_9)$	$e(\varepsilon_{10})$
1,136	1,102	1,069	1,036	1,003	0,97	0,937	0,904	0,871	0,838	0,806
$a(\varepsilon_0)$	$a(\varepsilon_1)$	$a(\varepsilon_2)$	$a(\varepsilon_3)$	$a(\varepsilon_4)$	$a(\varepsilon_5)$	$a(\varepsilon_6)$	$a(\varepsilon_7)$	$a(\varepsilon_8)$	$a(\varepsilon_9)$	$a(\varepsilon_{10})$
$4,17 \cdot 10^5$	$4,165 \cdot 10^5$	$4,159 \cdot 10^5$	$4,153 \cdot 10^5$	$4,146 \cdot 10^5$	$4,139 \cdot 10^5$	$4,132 \cdot 10^5$	$4,124 \cdot 10^5$	$4,115 \cdot 10^5$	$4,106 \cdot 10^5$	$4,096 \cdot 10^5$
ξ_0	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7	ξ_8	ξ_9	ξ_{10}
$4,17 \cdot 10^3$	$8,335 \cdot 10^3$	$12,49 \cdot 10^3$	$16,64 \cdot 10^3$	$20,79 \cdot 10^3$	$24,93 \cdot 10^3$	$29,06 \cdot 10^3$	$33,18 \cdot 10^3$	$37,29 \cdot 10^3$	$41,40 \cdot 10^3$	$45,50 \cdot 10^3$

Таблица 2 / Table 2

**Функциональная зависимость «скорость движения – скорость волны»,
расчетные значения других используемых параметров, $\rho_1 = \rho_2 = 1000$
Functional dependence of the speed of movement – the speed of the wave,
the calculated values of other parameters used, $\rho_1 = \rho_2 = 1000$**

ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}
0,925	0,900	0,875	0,85	0,825	0,800	0,775	0,750	0,725	0,700	0,675
$e(\varepsilon_0)$	$e(\varepsilon_1)$	$e(\varepsilon_2)$	$e(\varepsilon_3)$	$e(\varepsilon_4)$	$e(\varepsilon_5)$	$e(\varepsilon_6)$	$e(\varepsilon_7)$	$e(\varepsilon_8)$	$e(\varepsilon_9)$	$e(\varepsilon_{10})$
1,136	1,102	1,069	1,036	1,003	0,97	0,937	0,904	0,871	0,838	0,806
$f(\varepsilon_0)$	$f(\varepsilon_1)$	$f(\varepsilon_2)$	$f(\varepsilon_3)$	$f(\varepsilon_4)$	$f(\varepsilon_5)$	$f(\varepsilon_6)$	$f(\varepsilon_7)$	$f(\varepsilon_8)$	$f(\varepsilon_9)$	$f(\varepsilon_{10})$
$7,223 \cdot 10^5$	$7,214 \cdot 10^5$	$7,204 \cdot 10^5$	$7,193 \cdot 10^5$	$7,182 \cdot 10^5$	$7,17 \cdot 10^5$	$7,156 \cdot 10^5$	$7,143 \cdot 10^5$	$7,128 \cdot 10^5$	$7,112 \cdot 10^5$	$7,094 \cdot 10^5$
ξ_0	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7	ξ_8	ξ_9	ξ_{10}
$7,223 \cdot 10^3$	$14,44 \cdot 10^3$	$21,64 \cdot 10^3$	$28,83 \cdot 10^3$	$36,01 \cdot 10^3$	$43,18 \cdot 10^3$	$50,34 \cdot 10^3$	$57,48 \cdot 10^3$	$64,62 \cdot 10^3$	$71,75 \cdot 10^3$	$78,86 \cdot 10^3$

Задавая на границе скорость движения конца сети как функцию времени, можно определить деформацию как функцию времени на конце сети и вышеуказанным образом всюду в области DOt . Для примера возьмем $\xi = kt$, тогда $t = f(\xi)/k$.

В зависимости от распределения скорости на границе определяется распределение деформации постоянной на характеристиках (рис. 3).

Заключение

Решение с помощью уравнений характеристик показывает возникновение бегущих волн. Методом характеристик построено решение практических задач распространения волн в новой среде, моделирующей армированные материалы и материи определенной конструкции. Полученные результаты могут быть использованы в различных областях авиации, рыболовства и строительства.

Список литературы

1. Agalarov J.H., Mamedova G.A., Gasanova T.J. Unloading wave in a cylindrical net // *Mechanics of Solids*. 2019. Vol. 54. No. 8. Pp. 1138–1143. <https://doi.org/10.3103/S0025654419080028>
2. Rustamova M.A. Unloading wave in the cylindrical network from nonlinear elastic fibers // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019. Vol. 15. No. 2. Pp. 149–157. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-149-157>
3. Agalarov J.H., Gulieva M.A. Movement equation of a net in the plane // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук. Математика и механика*. 1998. Т. XVIII. № 2. С. 103–105.
4. Seyfullayev A.I., Gulieva M.A. To the solution of the equilibrium problem of the net // *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. Baku, 2000. Vol. XIII. Pp. 144–147.
5. Агаларов Д.Г., Сейфуллаев А.И., Гулиева М.А. Численное решение одной плоской задачи равновесия сети // *Механика, машиностроение*. 2001. № 1. С. 3–4.
6. Gulieva M.A. Tension of a rectangular net fastened from two adjacent sides // *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. 2002. Vol. XVI (XXIV). Pp. 156–160.
7. Agalarov J.H., Gulieva M.A. Waves of strong breaks in nets // *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. 2002. Vol. XVII (XXV). Pp. 135–137.
8. Агаларов Д.Г. Исследование движения сетей при ударе // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук*. 1982. № 6. С. 38–41.
9. Agalarov J.H., Efendiev A.N. The propagation of nonlinear waves in a structure consisting of net system // *Journal of Structural Mechanics*. 1988. Vol. 21. No. 2. Pp. 3–10.
10. Баренблат Г.И. О распространении мгновенных возмущений в среде с нелинейной зависимостью напряжений от деформаций // *Прикладная математика и механика*. 1953. Т. 17. № 4. С. 455–460.
11. Керимов К.А. Методика определения ударной диаграммы растяжений // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук*. 1960. № 3. С. 27–30.
12. Зверев И.Н. Некоторые задачи о распространении волн при ударе: дис. ... канд. ф.-м. наук. Самарканд, 1949. 93 с.
13. Нуриев Б.Р. Косой удар конусом по упругой и упруго-пластической нити // *Деп. ВИНТИ от I4.If.1975*. № 2968-75.
14. Агаларов Д.Г., Рахматулин Х.А., Нуриев Б.Р. Удар конусом по нити с большими скоростями // *Распространение упругих и упруго-пластических волн: сборник материалов VI Всесоюзного симпозиума*. Фрунзе, 1978.
15. Рахматулин Х.А. Об ударе по гибкой нити // *Прикладная математика и механика*. 1947. Т. 10. № 3. С. 379–382.
16. Касумов О.К. Поперечный удар по сетчатой полосе // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук*. 1986. № 2. С. 62–66.
17. Агаларов Д.Г. Исследование движения сетей при ударе // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук*. 1982. № 6. С. 38–41.
18. Касумов О.К. Плоское движение сетей при ударе // *Известия Академии наук Азербайджанской ССР. Серия физико-математических и технических наук*. 1983. № 3. С. 30–36.
19. Касумов О.К. Удар по полубесконечной сети // *Деп. в ВИНТИ*. 1982. № 3782-82.
20. Зонов А.И. Геометрия рыболовной сети и ее равновесное состояние // *Известия ГНИ-ИОиРРХ*. 1971. Т. 73. С. 96–167.

References

1. Agalarov J.H., Mamedova G.A., Gasanova T.J. Unloading wave in a cylindrical net. *Mechanics of Solids*. 2019;54(8):1138–1143. <https://doi.org/10.3103/S0025654419080028>
2. Rustamova M.A. Unloading wave in the cylindrical network from nonlinear elastic fibers. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(2):149–157. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-149-157>
3. Agalarov J.H., Gulieva M.A. Movement equation of a net in the plane. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 1998;XVIII(2):103–105.
4. Seyfullayev A.I., Gulieva M.A. To the solution of the equilibrium problem of the net. *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. 2000;XIII:144–147.
5. Agalarov D.G., Seyfullaev A.I., Gulieva M.A. The numerical decision of one flat problem of balance of a network. *The Mechanic Engineering*. 2001;(1):3–4. (In Russ.)
6. Gulieva M.A. Tension of a rectangular net fastened from two adjacent sides. *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. 2002;XVI(XXIV):156–160.
7. Agalarov J.H., Gulieva M.A. Waves of strong breaks in nets. *Proceedings of Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan*. 2002;XVII(XXV):135–137.
8. Agalarov J.H. Research of movement of networks at blow. *News of Academy of Sciences of the Azerbaijan Soviet Socialist Republic. Series of Physicotechnical and Mathematical Sciences*. 1982;(6):38–41. (In Russ.)
9. Agalarov J.H., Efendiev A.N. The propagation of nonlinear waves in a structure consisting of net system. *Journal of Structural Mechanics*. 1988;21(2):3–10.
10. Barenblat G.I. About distribution of instant indignations to the environment with nonlinear dependence of pressure on deformations. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1953;17(4):455–460. (In Russ.)
11. Kerimov K.A. Method of determining the shock diagram of stretching. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 1960;(3):27–30. (In Russ.)
12. Zverev I.N. *Some problems of wave propagation at impact* (Ph.D. dissertation). Samarkand; 1949. (In Russ.)
13. Nuriev B.R. Oblique blow with a cone on an elastic and elastic-plastic thread. *Dep. VINITI from I4.If.I975*. No. 2968-75. (In Russ.)
14. Agalarov D.G., Rakhmatulin H.A., Nuriev B.R. Impact of a cone on a thread with high speeds. *Propagation of Elastic and Elastoplastic Waves: Collection of Materials of the VI All-Union Symposium*. Frunze; 1978. (In Russ.)
15. Rakhmatulin Kh.A. On hitting a flexible thread. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1947;XII:379–382. (In Russ.)
16. Kasumov O.K. Transverse impact on the mesh strip. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 1986;(2):62–66. (In Russ.)
17. Agalarov J.H. Research of movement of networks at blow. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 1982;(6):38–41. (In Russ.)
18. Kasumov O.K. Flat motion of nets on impact. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR. Series of Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 1983;(3):30–36. (In Russ.)
19. Kasumov O.K. A blow to a semi-infinite network. *Dep. in VINITI*. 1982. No. 3782–82. (In Russ.)
20. Zonov A.I. Geometry of a fishing net and its equilibrium state. *Izvestiia GNI-IOiRRKH*. 1971;73:96–167. (In Russ.)