



Advanced Engineering Research

Теоретический и научно-практический журнал

Том **21**

№ **4**
2021

Vol. **21**

no. **4**
2021

ISSN 2687-1653



1

Механика

Mechanics

2

Машиностроение и машиноведение

Machine Building and Machine Science

3

Информатика, вычислительная техника и управление

Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/2687-1653

vestnik-donstu.ru

Advanced Engineering Research

Т. 21, № 4

Теоретический
и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
октябрь-декабрь 2021 г.

ISSN 2687-1653
DOI: 10.23947/2687-1653

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Название журнала (до августа 2020): Вестник Донского государственного технического университета

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
- 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
- 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
- 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
- 05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
- 05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
- 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
- 05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
- 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
- 05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
- 05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), в международной базе EBSCO (Academic Search Ultimate Magazines and Journal), Dimensions, CyberLeninka, ROAD, GoogleScholar.

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:

И. В. Бойко, Г. И. Рассохин, М. П. Смирнова (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372

E-mail: vestnik@donstu.ru

<http://vestnik-donstu.ru/>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

© Донской государственный технический университет, 2021

Редакционная коллегия:

Главный редактор — **Б. Ч. Месхи**, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

заместитель главного редактора — **В. П. Димитров**, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

ответственный редактор — **М. Г. Комахидзе**, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

ответственный секретарь — **Н. А. Шевченко**, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

Али М. Хасан, доцент кафедры физиологии и медицинской физики, Медицинский колледж Университета Аль-Нахрейн (Ирак)

Ахмет Уюмаз, кандидат технических наук, доцент, профессор, директор Высшей школы естественных и прикладных наук, профессор кафедры машиностроения, университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоя (Турция)

Ахилан Аппатурай, доктор, доцент кафедры электроники и Инженерия связи, Инженерно-технологический колледж PSN, Университет Анны Ченнаи (Индия)

Музафер Сарачевич, профессор, Факультет компьютерных наук, Университет Нови-Пазара (Сербия)

Мурат Тезер, Ближневосточный университет (Турция)

Хамид Абдулла Джалаб, доктор, профессор кафедры компьютерных систем и технологий, Факультет компьютерных наук и информационных технологий, Малайский университет (Малайзия)

Хучан Ляо, профессор доктор, научный сотрудник ИААМ; Старший член Школы бизнеса IEEE, Университет Сычуань, (Китай)

Басмачи Гюльтекин, кандидат технических наук, доцент, профессор, начальник отдела машиностроения, университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоя (Турция)

Козубал Януш Виталис, доктор технических наук, доцент, профессор, Вроцлавский технический университет (Польша)

Аныш Губерт, доктор философии, доцент, Факультет гражданского строительства, Варшавский технологический университет (Польша)

Е. В. Агеев, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Российская Федерация);

В. И. Андреев, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Российская Федерация);

И. Р. Антибас, кандидат технических наук, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

К. С. Ахвердиев, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Российская Федерация);

С. М. Айзикович, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

Д. А. Безуглов, доктор технических наук, профессор, Ростовский филиал Российской таможенной академии (Российская Федерация);

Бертрам Торстен, доктор технических наук, профессор, Технический университет (Германия);

В. Н. Варавка, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

И. М. Вернер, доктор технических наук, профессор, Технологический институт в Израиле (Израиль);

Н. Е. Галушкин, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты (Российская Федерация);

Лару К. Гиллесп, доктор технических наук, профессор, Президент Общества машиностроителей (США);

О. В. Дворников, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет (Беларусь);

К. О. Егизарян, доктор технических наук, профессор, Технологический университет Тампере (Финляндия);

В. А. Еремеев, доктор физико-математических наук, профессор, Южный научный центр РАН (Российская Федерация);

В. Л. Заковоротный, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

А. А. Короткий, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

В. М. Курейчик, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет (Российская Федерация);

Г. В. Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор, Томский политехнический университет (Российская Федерация);

В. И. Марчук, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты (Российская Федерация);

И. П. Мирошниченко, кандидат технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

М. А. Мукутадзе, доктор технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (Российская Федерация);

В. Г. Мокрозуб, доктор технических наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет (Российская Федерация);

Нгуен Донг Ань, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Академии наук и технологий Вьетнама (Вьетнам);

В. И. Лысак, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Российская Федерация);

П. М. Огар, доктор технических наук, профессор, Братский государственный университет (Российская Федерация);

С. Г. Паршин, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет (Российская Федерация);

Н. Н. Прокопенко, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

В. Л. Попов, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Берлинского технического университета (Германия);

В. Н. Сидоров, доктор технических наук, Российский университет транспорта (Российская Федерация);

А. Н. Соловьёв, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

А. И. Сухинов, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

М. А. Тамаркин, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет, (Российская Федерация);

Г. А. Угольников, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет (Российская Федерация);

М. Б. Флекс, доктор технических наук, профессор, ПАО «Роствертол» (Российская Федерация);

Л. В. Черкесова, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация);

А. Н. Чукарин, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Российская Федерация);

Б. М. Языев, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Российская Федерация).

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

- Гайджуrow П. П., Савельева Н. А., Труфанова Е. В.* Численное моделирование поведения кинематически нестабильных склонов при динамических воздействиях..... 300

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Молоков К. А., Новиков В. В.* Оценка трещиностойкости сварных соединений с мягкими прослойками..... 308
- Антибас И. Р., Дьяченко А. Г., Саед Бакир Имад* Влияние температуры жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах..... 319
- Попов А. В., Самуйлов А. О., Черепанов И. С.* Применение и оценка технического состояния композиционных материалов в летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля 328
- Рыбак А. Т., Ивановская А. В., Батура П. П., Пелипенко А. Ю.* Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах 337

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Хуберт Аныш* Применение инструментов машинного обучения и интеллектуальный анализ данных в отношении баз данных с небольшим количеством записей..... 346
- Елшамы М. М. М., Тиратурян А. Н., Углова Е. В.* Оценка модуля упругости слоев дорожного покрытия с использованием различных типов моделей нейронных сетей..... 364
- Глушко С. Г., Ляпин А. А., Шатилов Ю. Ю., Черпаков А. В., Ракеш К. Х.* Разработка программного модуля для параметрического построения геометрии ферменной конструкции в двумерной постановке 376

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 539.42

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-300-307>

Численное моделирование поведения кинематически нестабильных склонов при динамических воздействиях

П. П. Гайджуров , Н. А. Савельева , Е. В. Труфанова 

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ gpp-161@yandex.ru



Введение. Предложена концепция оценки динамических параметров системы «основание — ослабленный слой — блок» с учетом физической нелинейности материала при кинематическом способе возбуждения колебаний. В соответствии с данным подходом учет физической нелинейности материала основания и блока осуществляется с помощью модели Друкера-Прагера. Ослабленный слой моделируется 3D пружинными конечными элементами. На примере динамического расчета системы «основание — ослабленный слой — склон» осуществлена процедура верификации предлагаемой методики.

Материалы и методы. Вычислительные эксперименты выполнены с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical в сочетании с нелинейным решателем, базирующемся на процедуре Ньютона-Рафсона. Для дискретизации расчетных областей применены объемные конечные элементы SOLID45. Для моделирования смещения блока относительно неподвижного основания использованы комбинированные упруго-вязкие элементы COMBIN14.

Результаты исследования. Разработана инженерная методика динамического анализа напряженно-деформированного состояния пространственной системы «основание — ослабленный слой — блок» при кинематическом способе возбуждения колебаний. На числовых примерах исследована точность и сходимость предлагаемой методики.

Обсуждение и заключения. На основании выполненного математического моделирования показано, что разработанная методика позволяет оценить риски возникновения реальных оползневых процессов, обусловленных внешними нестационарными воздействиями.

Ключевые слова: метод конечных элементов, модель Друкера-Прагера, метод Ньютона-Рафсона, динамическое моделирование, склон, оползневой процесс.

Для цитирования: Гайджуров, П. П. Численное моделирование поведения кинематически нестабильных склонов при динамических воздействиях / П. П. Гайджуров, Н. А. Савельева, Е. В. Труфанова // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 300–307. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-300-307>

© Гайджуров П. П., Савельева Н. А., Труфанова Е. В., 2021



Numerical simulation of the behavior of kinematically unstable slopes under dynamic influences

P. P. Gaidzhurov , N. A. Saveleva , E. V. Trufanova 

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

✉ gpp-161@yandex.ru

Introduction. The concept of estimating the dynamic parameters of the “base — weakened layer — block” system is proposed, taking into account the physical nonlinearity of the material and the kinematic method of excitation of vibrations. In accordance with this approach, the physical nonlinearity of the base and block material is considered using the Drucker-Prager model. The weakened layer is modeled by 3D spring finite elements. The verification procedure of the proposed methodology is carried out on the example of the dynamic calculation of the “base — weakened layer — slope” system.

Materials and Methods. The computational experiments were performed using the ANSYS Mechanical software package in combination with a nonlinear solver based on the Newton-Raphson procedure. SOLID45 volumetric finite elements were used to discretize the computational domains. Combined elastic-viscous elements COMBIN14 were used to simulate the displacement of the block relative to the fixed base.

Results. An engineering technique for the dynamic analysis of the stress-strain state of the “base — weakened layer — block” spatial system with kinematic method of excitation of vibrations is developed. The accuracy and convergence of the proposed method is investigated using specific numerical examples.

Discussion and Conclusion. Based on the mathematic simulation performed, it is shown that the developed technique provides assessing the risks of the occurrence of real landslide processes caused by external non-stationary impacts.

Keywords: finite element method, Drucker-Prager model, Newton-Raphson method, dynamic modeling, slope, landslide process.

For citation: P. P. Gaidzhurov, N. A. Saveleva, E. V. Trufanova. Numerical simulation of the behavior of kinematically unstable slopes under dynamic influences. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 300–307. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-300-307>

Введение. В 70-х годах прошлого века началось широкое использование метода конечных элементов (МКЭ) при анализе статической устойчивости склонов и откосов [1–3]. Как показала практика геотехнических расчетов МКЭ в отличие от упрощенных методик позволил учесть такие важные факторы как реальную геометрию и послойную структуру исследуемых объектов, а также наличие противооползневых сооружений и физическую нелинейность материала с заранее неизвестной областью пластичности [4]. В настоящее время многие исследователи стали применять МКЭ для анализа динамической устойчивости склонов реального заложения, а также прогнозирования рисков обвалов горных пород в подземных выработках и со склонов, расположенных вдоль автомобильных и железнодорожных магистралей. Также одним из актуальных направлений горной динамики является конечно-элементное моделирование последствий землетрясений с учетом кинематической нестабильности конгломераций [5]. В настоящее время существуют следующие методы динамических расчетов в области геотехники:

1. SRM (strength reduction method) — метод снижения прочности [6, 7]. Разработан для расчета запаса прочности горного массива в физически нелинейной постановке. В SRM фактические прочностные параметры грунта итерационно уменьшаются путем деления на некоторый коэффициент больше 1:

$$c' = \frac{c}{k_{SRM}}; \quad \phi' = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{k_{SRM}}\right),$$

где c , ϕ — фактические значения сцепления и угла внутреннего трения грунта соответственно; c' , ϕ' — сцепление и угол внутреннего трения грунта соответственно после их уменьшения относительно фактических значений; k_{SRM} — коэффициент снижения сдвиговой прочности. Величина k_{SRM} , соответствующая предельному состоянию системы, определяет нижнюю границу прочностных параметров материала.

2. LEM (limit equilibrium method) — метод предельной кинетики, базирующийся на принципе Даламбера [8, 9]. Ориентирован на анализ динамической устойчивости сочлененных массивов горных пород.

3. TLEM (thin layer element method of FEM) — метод тонкослойных конечных элементов [10], в котором упругопластические элементы тонкого слоя используются для моделирования поведения кинематически нестабильных структур.

Анализ результатов, полученных с помощью методов SRM, LEM и TLEM, показал, что в настоящее время отсутствует единая концепция математического моделирования поведения структурно нестабильных геотехнических систем при нестационарном внешнем воздействии. Это обуславливает актуальность разработки методики динамического анализа систем типа «основание — ослабленный слой — блок» в конечно-элементной постановке с использованием нового подхода к моделированию плоскостей скольжения.

Материалы и методы. Уравнение движения механической системы в конечно-элементной формулировке представим в виде [11]:

$$[M]\{W''(t)\} + [C]\{W'(t)\} + [K]\{W(t)\} = \{F_0\} + \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, демпфирования и жесткости ансамбля конечных элементов соответственно;

$\{W''(t)\}$, $\{W'(t)\}$, $\{W(t)\}$ — векторы-столбцы соответственно узловых ускорений, скоростей, перемещений; $\{F_0\}$, $\{F(t)\}$ — векторы-столбцы заданных статических и динамических нагрузок соответственно в момент времени t . В дальнейшем полагаем, что матрицы $[M]$ и $[K]$ согласованные.

Для численного интегрирования уравнения (1) используем метод Ньюмарка [12]. При этом шаг интегрирования по временной оси Δt назначаем так, чтобы с достаточной точностью учитывались вклады физически значимых собственных пар. В дальнейшем рассмотрим кинематические способы возбуждения колебаний, заданные с помощью либо модельной сейсмограммы $\{\bar{W}(t)\}$, либо с помощью модельной акселерограммы $\{\bar{W}''(t)\}$. При таком способе задания динамического воздействия второе слагаемое правой части уравнения (1) будет равно нулю: $\{F(t)\}=0$.

Рассмотрим способ возбуждения механических колебаний посредством модельной сейсмограммы. Функцию $\bar{W}(t)$ представим в виде [13]:

$$\bar{W}(t) = A t e^{-\chi t} \sin(\theta t), \quad (2)$$

где A — начальная амплитуда; χ — коэффициент затухания; θ — угловая частота внешнего воздействия. На рис. 1. приведен график функции $\bar{W}(t)$ для значений: $A = 0,01553$ м; $\chi = 0,7143$; $\theta = 5 \text{ с}^{-1}$.

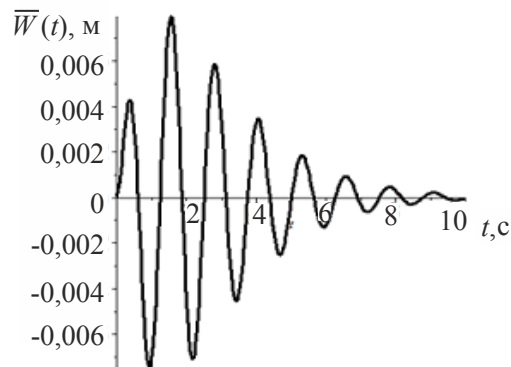


Рис. 1. График модельной сейсмограммы

Результаты исследования. В качестве первого модельного примера рассмотрим задачу о вынужденных колебаниях склона, расположенного на основании (рис. 2). Граничные условия задачи показаны на рис. 3, где буквой S обозначена исследуемая точка.

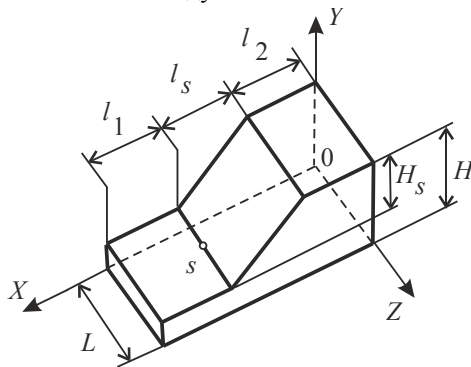


Рис. 2. Геометрия склона

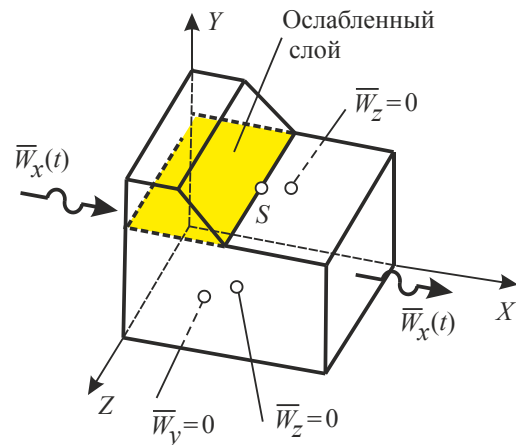


Рис. 3. Расчетная схема склона

Соотношения геометрических параметров склона и основания (рис. 2) представлены в таблице 1.

Таблица 1

Соотношения геометрических параметров

H	l_1	l_s	l_2	L
$3,5 H_s$	H_s	$(1,0-2,0) H_s$	H_s	$5 H_s$

Механические характеристики материала склона и основания: модуль деформации $E = 21$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; удельный вес $\gamma = 1702$ кг/м³; сцепление $c = 45$ кПа; угол внутреннего трения $\phi = 15^\circ$.

Для моделирования склона и основания используем объемные конечные элементы SOLID45 программного комплекса ANSYS Mechanical. Конечно-элементная модель для варианта с параметрами: $l_s = 2H_s$, $H_s = 10$ м, отнесенная к глобальной декартовой системе координат, приведена на рис. 4.

Конечно-элементная сетка построена таким образом, что на поверхности контакта смежные узлы основания и склона имеют одинаковые координаты, но разные номера. Это принято для того, чтобы разместить в этом месте ослабленный слой. Кинематическое воздействие в форме модельной сейсмограммы (2) задаем на каждом шаге интегрирования t_i в виде узловых перемещений $\bar{W}_x(t_i)$ на торцовых поверхностях модели с параметрами: $X = 0$ и $X = l_1 + l_s + l_2$.

Моделирование ослабленного слоя (рис. 4) выполняем с помощью упруго-вязких комбинированных конечных элементов COMBIN14 [14]. Двухузловой элемент COMBIN14, состоящий из пружины жесткостью k и демпфера жидкостного трения с коэффициентом демпфирования c_v , приведен на рис. 5. В рассматриваемом случае этот элемент работает только на растяжение-сжатие.

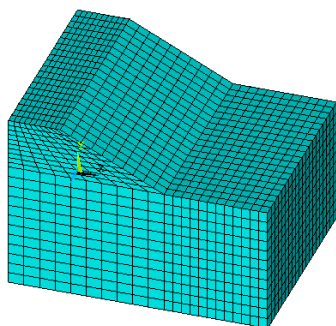


Рис. 4. Конечно-элементная модель системы «основание — склон»

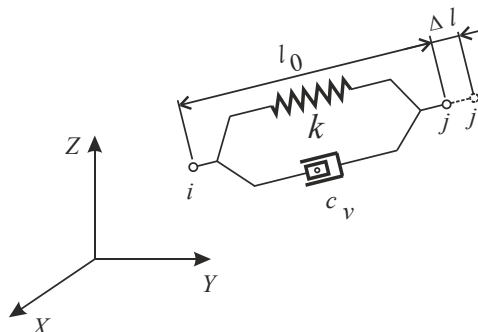


Рис. 5. Комбинированный конечный элемент COMBIN14

В каждом узле контактной поверхности (рис. 4) вдоль глобальных осей X , Y , Z вводим элементы COMBIN14. Параметры комбинированных элементов:

$$k_x = 30 \text{ кН/м}; k_y = k_z = 9,44 \cdot 10^7 \text{ кН/м}; c_v = 0,5.$$

В этом примере и далее вводим допущение о естественном недеформированном состоянии системы «основание — ослабленный слой — склон». Для вычислений используем нелинейный решатель комплекса ANSYS Mechanical.

Результаты конечно-элементного моделирования в виде визуализации деформированного состояния системы «основание — склон» с учетом максимального горизонтального смещения и распределения амплитудных горизонтальных перемещений $W_x(t)$ показаны на рис. 6 и 7. Шаг интегрирования уравнения (1) $\Delta t = 0,01$ с. Как видно, введение 3D упруго-вязких элементов позволяет смоделировать эффект кинематической нестабильности механической системы «основание — ослабленный слой — склон» при кинематическом способе возбуждения колебаний.

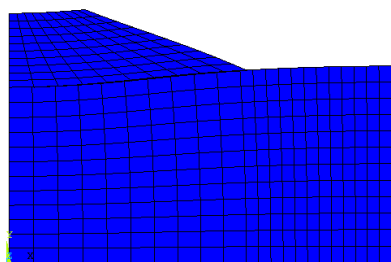


Рис. 6. Визуализация смещения склона относительно основания

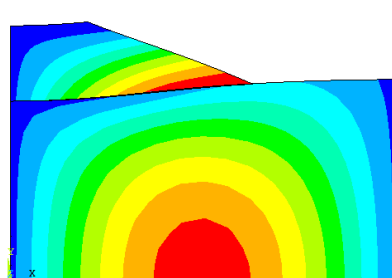
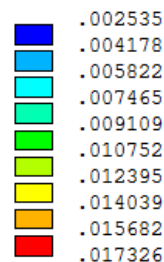


Рис. 7. Распределение перемещений $W_x(t)$

$W_x(t)$, м



Амплитудное значение перемещения в точке S составило $W_{x_s \max} = 1,7$ см. Для варианта склона $l_s = H_s$ (рис. 2) $W_{x_s \max} = 1,1$ см. Графики колебаний основания и склона в исследуемой точке S (рис. 3) в направлении оси X приведены на рис. 8.

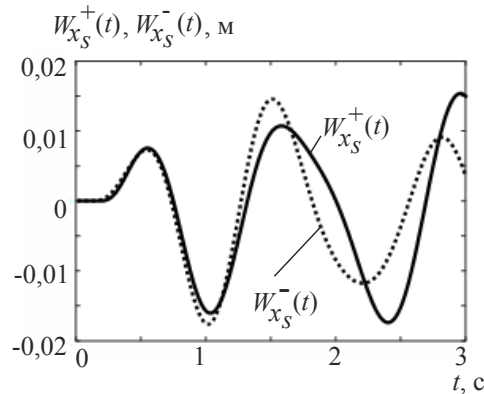


Рис. 8. Графики колебаний в точке S основания $W_{x_s}^+(t)$ и склона $W_{x_s}^-(t)$ при кинематическом возбуждении с помощью модельной сейсмограммы

На основании приведенных графиков видно, что начиная с момента времени $t > 1,5$ с наблюдается рассогласование колебаний основания и склона.

Рассмотрим поведение системы «основание — ослабленный слой — склон» (рис. 3) при возбуждении колебаний с помощью модельной акселерограммы $\overline{W}''(t)$. С этой целью дважды продифференцируем выражение (2). В результате получим:

$$\overline{W}''(t) = A e^{-\chi t} [\chi^2 \sin(\theta t) t - 2\chi \cos(\theta t) \theta t - \sin(\theta t) \theta^2 t - 2\chi \sin(\theta t) + 2\cos(\theta t) \theta]. \quad (3)$$

График функции (3) для параметров: $A = 0,01553$ м; $\chi = 0,7143$; $\theta = 5 \text{ с}^{-1}$ показан на рис. 9.

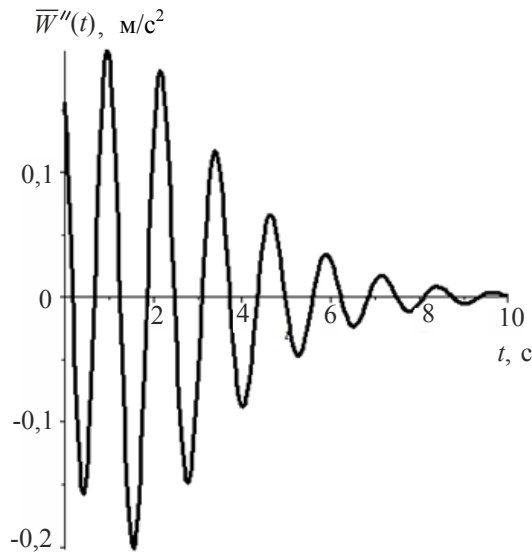
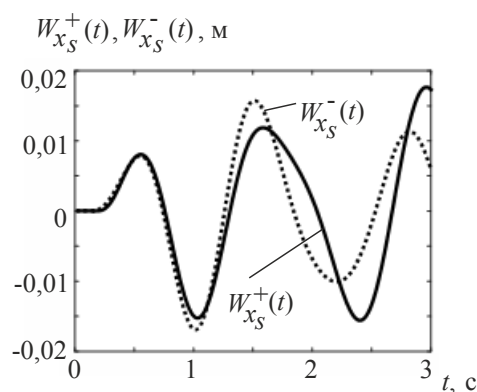


Рис. 9. График модельной акселерограммы

Кинематическое воздействие в форме модельной акселерограммы (3) по аналогии с сейсмограммой (2) задаем на каждом шаге интегрирования t_i в виде узловых ускорений $\overline{W}_x''(t_i)$ на торцовых поверхностях модели с параметрами: $X = 0$ и $X = l_1 + l_s + l_2$. На рис. 10 представлены графики колебаний в исследуемой точке S (рис. 3) при кинематическом воздействии в форме модельной акселерограммы. Сравнивая графики колебаний, приведенные на рис. 8 и 10, устанавливаем, что они практически совпадают. Это свидетельствует о корректности разработанной конечно-элементной модели, позволяющей описывать поведение системы «основание — ослабленный слой — склон» при различных способах нестационарного кинематического воздействия.


 Рис. 10. Графики колебаний в точке S основания $W_{x_S}^+(t)$ и склона $W_{x_S}^-(t)$

при кинематическом возбуждении колебаний с помощью модельной акселерограммы

В качестве второго модельного примера рассмотрим задачу о вынужденных колебаниях склона с кинематически нестабильным клиновидным включением (рис. 11). В связи с симметрией конфигурации, в расчетной схеме учитываем только 1/2 часть склона и включения. Граничные условия для принятой расчетной схемы показаны на рис. 12. Здесь буквой S обозначена исследуемая точка, принадлежащая одновременно основанию склона и клиновидному включению.

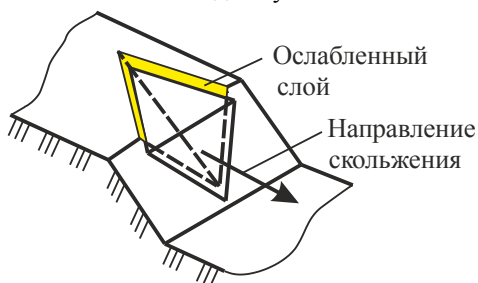


Рис. 11. Схема склона с клиновидным включением

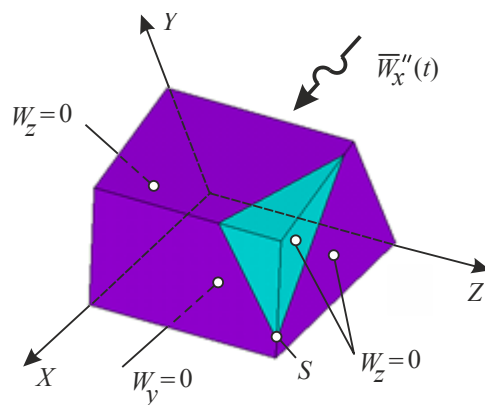


Рис. 12. Расчетная схема для задачи «склон — клиновидное включение»

Конечно-элементная модель склона и клиновидного включения показана на рис. 13. Как и в предыдущем примере, в данном случае используем элементы SOLID45 и COMBIN14 с теми же характеристиками материала.

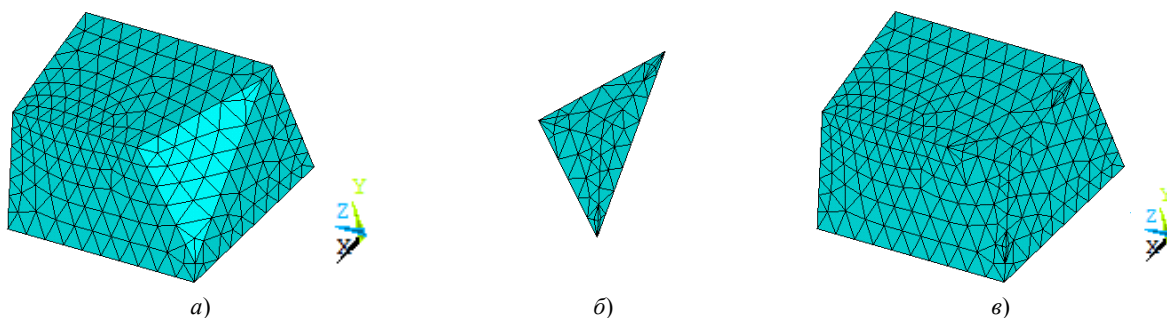
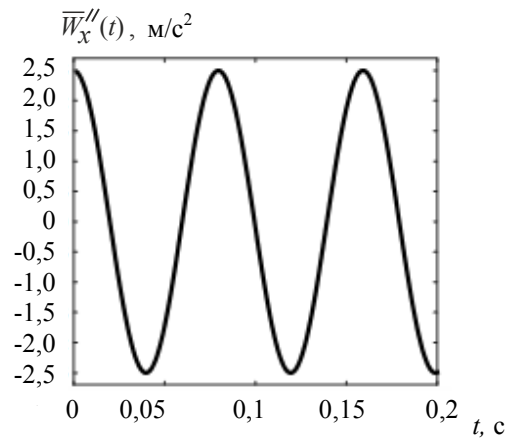


Рис. 13. Конечно-элементная модель: а — склон; б — клиновидное включение; в — склон с клиновидным включением

Функция, описывающая модельную акселерограмму, имеет вид:

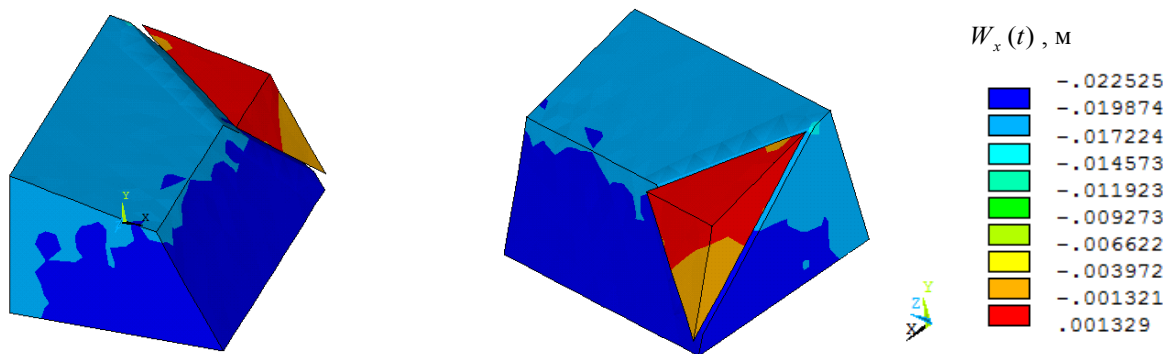
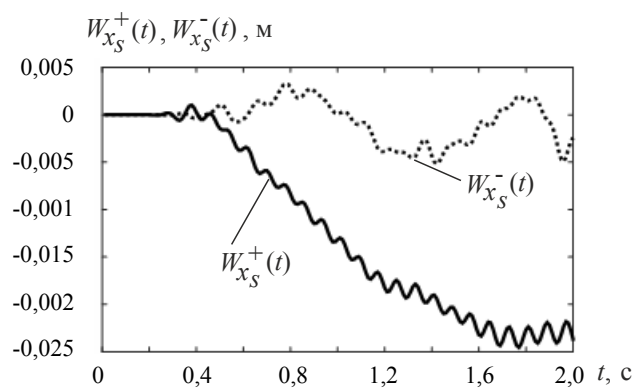
$$\overline{W}_x(t) = A \cdot \cos \theta t,$$

где A — амплитуда ускорения; θ — частота внешнего воздействия. На рис. 14 приведен график $\overline{W}_x(t)$ при $A = 2,5 \text{ м/с}^2$, $\theta = 2 \text{ Гц}$. Значения ускорения $\overline{W}_x(t_i)$ на i -том шаге интегрирования уравнения движения (1) прикладываем к узлам поверхности модели с координатой $X = 0$ (рис. 12).

Рис. 14. График модельной акселерограммы $\overline{W}_x''(t)$

Результат моделирования в виде распределения амплитудных значений перемещений $W_x(t)$ показан на рис. 15. Шаг интегрирования $\Delta t = 0,01$ с. Графики колебаний основания склона и клиновидного включения в исследуемой точке S (рис. 12) в направлении оси X приведены на рис. 16.

Как видно из рис. 15 при заданном кинематическом воздействии происходит разрыв сплошности массива склона по ослабленному слою и клиновидное включение смещается относительно основания склона вдоль оси X .

Рис. 15. Распределения $W_x(t)$ в 1/2 части склона с клиновидным включениемРис. 16. Графики колебаний в точке S основания склона $W_{x_S}^+(t)$ и клиновидного включения $W_{x_S}^-(t)$ при кинематическом возбуждении колебаний с помощью модельной акселерограммы

«Дрейф» $W_{x_S}^+(t)$ на рис. 16 обусловлен тем, что данная конечно-элементная модель не имеет связей, препятствующих смещениям вдоль оси X . Как показано в [11], решить проблему «дрейфа» можно путем вычитания из значений перемещений $W_{x_S}^+(t)$ и $W_{x_S}^-(t)$ перемещения основания склона, которое представляет собой смещение «как жесткое целое». Отметим, что полученные амплитудные значения перемещений $W_{x_S}^+(t)$ и $W_{x_S}^-(t)$ позволяют оценить динамические параметры системы «склон — ослабленный слой — клиновидное включение».

Закключение. Разработана и верифицирована конечно-элементная модель для исследования динамического поведения кинематически нестабильных склонов в трехмерной постановке с учетом физической

нелинейности материала.

Библиографический список

1. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. — Москва : Недра, 1987. — 221 с.
2. Eberhardt, E. Rock Slope Stability Analysis – Utilization of Advanced Numerical Techniques / Erik Eberhardt. — Vancouver, Canada: Geological Engineering/Earth Ocean Sciences, UBS, 2003. — 41 p.
3. Hoek, H. Rock Slope Engineering. 3rd ed. / H. Hoek, J. W. Bray. — London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1981. — 358 p.
4. Griffiths, D. V. Slope stability analysis by finite elements / D. V. Griffiths, P. A. Lane // Geotechnique. — 1999. — Vol. 49. — P. 387–403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
5. Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. — Alberta, Canada, 2015. — 244 p.
6. Tamotsu Matsui. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique / Tamotsu Matsui, Ka-Ching San // Soils and Foundations. — 1992. — Vol. 32. — P. 59–70. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.59>
7. Griffiths, D. V. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements / D. V. Griffiths, R. M. Marquez // Geotechnique. — 2007. — Vol. 57. — P. 537–546. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537>
8. Weida Ni. Dynamic Stability Analysis of Wedge in Rock Slope Based on Kinetic Vector Method / Weida Ni, Huiming Tang, Xiao Liu, et al. // Journal of Earth Science. — 2014. — Vol. 25. — P. 749–756.
9. Md. Moniruzzaman Moni. Stability analysis of slopes with surcharge by LEM and FEM / Md. Moniruzzaman Moni, Md. Mahmud Sazzad // International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering. — 2015. — Vol. 4. — P. 216–225.
10. Tongchun Li. Strength Reduction Method for Stability Analysis of Local Discontinuous Rock Mass with Iterative Method of Partitioned Finite Element and Interface Boundary Element / Tongchun Li, Jinwen He, Zhao Lanhao, et al. // Mathematical Problems in Engineering. — 2015. — Vol. 2015. — P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/872834>
11. Гайджуров, П. П. Моделирование динамического отклика системы «основание — фундамент — верхнее строение» при различных способах кинематического возбуждения колебаний / П. П. Гайджуров, А. В. Сазонова, Н. А. Савельева // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2019. — № 1 (201). — С. 23–30. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2019-1-23-30>
12. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. М. Вилсон. — Москва : Стройиздат, 1982. — 448 с.
13. Сейсмостойкое строительство зданий / И. Л. Корчинский, Л. А. Бородин, А. Б. Гроссман [и др.]. — Москва : Высшая школа, 1971. — 320 с.
14. Гайджуров, П. П. Конечно-элементное моделирование совместной работы оползня скольжения и защитного сооружения / П. П. Гайджуров, Н. А. Савельева, В. А. Дьяченков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 133–142. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-133-142>

Поступила в редакцию 27.09.2021

Поступила после рецензирования 18.10.2021

Принята к публикации 25.10.2021

Об авторах:

Гайджуров Петр Павлович, профессор кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, [Scopus](#), [ORCID](#), gpp-161@yandex.ru

Савельева Нина Александровна, старший преподаватель кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [Scopus](#), [ORCID](#), ninasav86@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [Scopus](#), [ORCID](#), el.trufanova@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. П. Гайджуров — постановка задачи, выбор методов решения, построения математической и компьютерной моделей, обсуждение результатов. Н. А. Савельева — выполнение обзора и расчетов, обсуждение результатов. Е. В. Труфанова — выполнение обзора и расчетов, обсуждение результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.05:620.17

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-308-318>

Оценка трещиностойкости сварных соединений с мягкими прослойками



К. А. Молоков^{1,2}  , В. В. Новиков¹ 

¹ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса» (г. Владивосток, Российская Федерация)

 Spektrum011277@gmail.com

Введение. Рассмотрены сварные соединения в металлических крупногабаритных сооружениях (например, в конструкциях корпусов кораблей), подверженных малоцикловой усталости. Отмечено характерное для них появление мягких прослоек, которые при рабочих нагрузках значительно пластически деформируются. Деформация структуры металла с повреждениями, особенно в виде трещин, снижает прочность и надежность элементов конструкций и соединений. Предварительная деформация отрицательно влияет на пластичность, поэтому многое зависит от остаточной пластичности трескающегося материала. При этом с уменьшением остаточной пластичности снижается такой важный показатель надежности, как сопротивление материала распространению трещины — вязкость разрушения.

Статья посвящена разработке модели, включающей аналитические зависимости для оценки трещиностойкости металлических конструкций и их сварных соединений с мягкими прослойками по пределу трещиностойкости при всех размерах трещин.

Материалы и методы. Используются теория и методы линейной механики разрушения материалов, структурно-механический подход. Результаты расчетов анализировались и сравнивались с экспериментальными данными и другими аналитическими решениями. Численный эксперимент выполнен для широко используемых в промышленности сталей феррито-перлитного класса Ст10, Ст50, 22К, Ст3сп и др., а также легированных закаленных на среднюю и высокую прочность 30ХГСА, 37ХНЗА и др.

Результаты исследования. Получены аналитические зависимости для расчета относительного предела трещиностойкости по трем основным известным механическим характеристикам материала мягкой прослойки сварного соединения.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для оценки трещиностойкости предварительно деформированных элементов конструкций и сварных соединений (в том числе с мягкими прослойками), работающих на поперечную нагрузку. Итоги экспериментальных данных и аналитических расчетов показаны в безразмерном виде, что позволяет получать инвариантные результаты по отношению к пределу трещиностойкости.

Ключевые слова: сварное соединение, мягкая прослойка, механическая неоднородность, деформация, предел трещиностойкости, длина трещины, контактное упрочнение, относительное удлинение.

Для цитирования: Молоков, К. А. Оценка трещиностойкости сварных соединений с мягкими прослойками / К. А. Молоков, В. В. Новиков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 308–318. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-308-318>

© Молоков К. А., Новиков В. В. 2021



Evaluation of crack resistance of welded joints with soft interlayers

K. A. Molokov^{1,2}  , V. V. Novikov¹ 

¹Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

²Vladivostok State University of Economics and Service (Vladivostok, Russian Federation)

 Spektrum011277@gmail.com

Introduction. Welded joints in large-sized metal structures (e.g., in the structures of ship hulls) subject to low-cycle fatigue are considered. The characteristic appearance of soft interlayers, which are significantly plastically deformed under working loads, was noted. Deformation of the metal structure with damage, especially in the form of cracks, reduces the strength and reliability of structural elements and joints. Pre-deformation negatively affects plasticity; therefore, much depends on the residual plasticity of the cracking material. At the same time, with a decrease in residual plasticity, such an important reliability indicator as the resistance of the material to crack propagation — the fracture toughness — decreases. The paper is devoted to the development of a model that includes analytical dependences for assessing the crack resistance of metal structures and their welded joints with soft interlayers according to the crack resistance limit for all crack sizes.

Materials and Methods. The theory and methods of linear mechanics of materials destruction, structural-mechanical approach are used. The calculation results were analyzed and compared to the experimental data and other analytical solutions. The numerical experiment was performed for the ferrite-perlite steel grades of 10, 50, 22K, St3sp, etc., widely used in industry, as well as for alloy steels hardened to medium and high strength of 30KhGSA, 37KhN3A, etc.

Results. Analytical dependences are obtained for calculating the relative crack resistance limit according to three main known mechanical characteristics of the state of the material of the soft interlayer of the welded joint.

Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to assess the crack resistance of pre-deformed structural elements and welded joints (including those with soft interlayers) operating under a transverse load. The results of experimental data and analytical calculations are shown in dimensionless form, which enables to obtain invariant results with respect to the fracture toughness limit.

Keywords: weld joint, soft interlayer, mechanical inhomogeneity, deformation, crack resistance limit, crack length, contact hardening, elongation.

For citation: K. A. Molokov, V. V. Novikov. Evaluation of crack resistance of welded joints with soft interlayers. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, p. 308–318. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-308-318>

Введение. В сварных соединениях, подверженных циклическим нагрузкам, часто возникают и развиваются трещины, которые могут стать причиной опасного состояния конструкций и их разрушения. В [1] приводятся примеры формирования таких трещин в корпусах судов. Кинетика образования в сварных швах макротрещин и их развитие зависят от множества факторов, что требует проведения комплексных исследований трещиностойкости сварных соединений и разработки соответствующих математических моделей.

На сопротивление металла распространению трещин существенно влияют появляющиеся после сварки так называемые мягкие прослойки, подверженные пластическому деформированию. Для разных участков сварного соединения характерна большая или меньшая степень неоднородности механических характеристик металла [2]. Она зависит от многих начальных условий технологического процесса. В их числе — скорость охлаждения зон сварного соединения и обработки свариваемой стали, а также содержание легирующих элементов, углерода и др. О. А. Бакши рассматривал некоторые проблемные вопросы вязкого и хрупкого разрушения механически неоднородных сварных соединений, влияния дефектов и микротрещин на процессы, происходящие в структуре металла при нагружении, и пр. Исследователи решили ряд частных задач по увеличению прочности и долговечности сварных соединений с прослойками [3–6].

При установившемся режиме сварки ширина зон термического влияния (ЗТВ) и механические свойства металла незначительно меняются по длине сварного соединения. Поэтому целесообразно рассматривать неоднородность характеристик в разных зонах в сварном соединении при поперечной нагрузке. Для закаливающихся или прошедших термическую обработку (термоупрочненных) металлов характерно появление закалочных структур или разупрочненных зон соответственно. При этом в зависимости от свойств стали в исходном состоянии и параметров технологического процесса могут образовываться мягкие зоны. Здесь предел текучести σ_T^M и предел прочности σ_B^M металла меньше, чем в соседних прилегающих (так называемых твердых) областях σ_T^T и σ_B^T . Таким образом, мягкая зона будет вовлекаться в пластическое деформирование между областями с характеристиками $\sigma_T^T > \sigma_T^M$, $\sigma_B^T > \sigma_B^M$ раньше соседних, а степень ее влияния на прочность

соединения будет зависеть от схемы приложенной нагрузки¹. Деформирование мягкой прослойки снижает сопротивляемость распространению трещины — инициируется интенсификация хрупкого разрушения, при котором критическая длина трещины уменьшится в разы [7].

Цель данного исследования — разработка аналитических зависимостей и математической модели для оценки трещиностойкости сварных соединений с мягкой прослойкой в результате ее предварительного пластического деформирования.

Допустим, что некоторое ограничение линейных размеров сварного образца (кроме толщины) под поперечной нагрузкой заметно не влияет на рассматриваемые в структуре металла процессы и явления (кроме образования мягкой прослойки), вызванные термическим циклом сварки.

Материалы и методы

Расчетные предпосылки. Рассмотрим изменение физико-механических характеристик металла мягкой прослойки при растяжении стыкового соединения поперек шва достаточно большой протяженности (рис. 1).

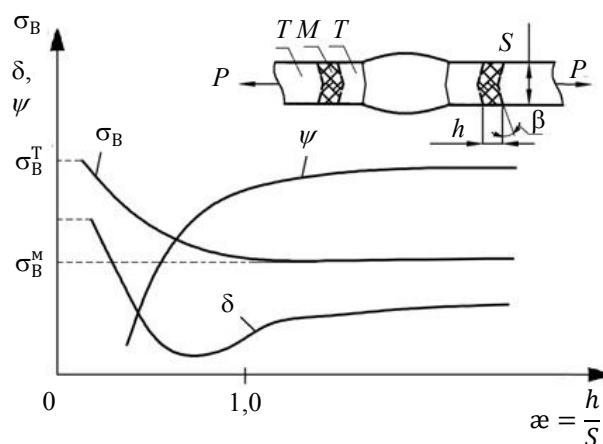


Рис. 1. Схема зависимости характеристик σ_B , δ и ψ от относительной толщины прослойки

В упругой стадии нагружения прослойка и соседние участки рассматриваемой области деформируются однородно. При достижении уровня напряжений, соответствующих пределу текучести σ_B^M , в ней образуется пластическая деформация, а соседние участки остаются в упругом состоянии. Для упрощения примем угол наклона грани прослойки $\beta = 0$ (рис. 1). При дальнейшем повышении нагрузки и деформации растет коэффициент поперечной деформации μ (коэффициент Пуассона) мягкой прослойки. В итоге он будет больше, чем у соседнего участка металла. По мере развития пластической деформации в прослойке $\mu \rightarrow 0,5$, а в областях с упругим состоянием металла $\mu = 0,3$. Из-за неодинаковой поперечной деформации в сварном шве возникают касательные напряжения. Максимальные их значения концентрируются в районе плоскостей раздела мягкой прослойки и соседних участков. Касательные напряжения препятствуют поперечному сужению мягкой прослойки в направлении толщины листа. Чем уже прослойка (т. е. чем меньше отношение $\alpha = h/s$, рис. 1), тем меньшее поперечное сужение она получает к моменту возникновения истинных разрушающих напряжений σ_p . Так возникает эффект контактного упрочнения, который обеспечивает повышение несущей способности.

Увеличение разрушающей силы имеет пределы. Соседние с мягкой прослойкой более прочные участки при определенных условиях тоже будут пластически деформироваться. Чем большей прочностью обладают соседние зоны и чем меньше относительная толщина прослойки α , тем заметнее эффект контактного упрочнения. Его усиливают более твердые прослойки, находящиеся вблизи относительно мягких.

Относительное поперечное сужение ψ в мягкой прослойке и абсолютное удлинение образца δ зависят от α и свойств металлов в соединении. В широких прослойках, когда еще нет контактного упрочнения, ψ остается постоянным при уменьшении α (рис. 1). А δ постепенно падает по мере уменьшения α в общей ширине сварного образца. В области контактного упрочнения ψ резко уменьшается, так как растут поперечные касательные напряжения, препятствующие сужению прослоек в направлении толщины материала. Относительное удлинение образца δ при этом также сначала уменьшается. Когда же реализуется существенная жесткость напряженного состояния в мягкой прослойке, δ возрастает, поскольку в пластическую деформацию вовлекается металл твердой прослойки. Отметим, что при сварке термоупрочненных сталей δ_5^M мягкой прослойки оказывается выше, чем δ_5^T . Но ее пластическая деформация значительно больше, и остаточная

¹ Матюхин Г. В., Молоков К. А. Прочность и надежность сварных соединений. Владивосток : ДВФУ, 2019. 143 с.

пластичность после нагружения до напряжений $\sigma_B^M > \sigma > \sigma_T^M$ может стать критической. В результате значительно уменьшается длина критической трещины, которая может возникнуть под действием дальнейших рабочих циклических напряжений на стыке мягкой и твердой прослоек. При этом существенно возрастает опасность хрупкого разрушения и следует оценить его возможность (предел трещиностойкости^{2,3} [8, 9]) в области с дефектом в виде трещины. При этом учитываются условия плоской деформации, контактного упрочнения и пластически деформированной мягкой прослойки. По результатам исследования деформирования слоев композитного материала методом конечноэлементного моделирования [3] можно заметить, что наибольшая деформация мягкой прослойки образуется около стыка ее с твердой прослойкой. Особенно четко это проявляется при средних значениях относительной толщины прослойки a .

Иногда при статической нагрузке удается найти оптимальное значение a и достичь равнопрочности соединения. Однако имеющиеся в мягкой прослойке дефекты или несплошности после некоторой ее деформации могут развиться в трещины с критической длиной при условии, что оставшаяся часть докритической деформации относительно мала. Степень контактного упрочнения в случае плоской деформации определяется по формуле² [2]:

$$K_a = \frac{\pi + \frac{1}{a}}{2\sqrt{3}}. \quad (1)$$

Временное сопротивление сварного соединения с мягкой прослойкой:

$$\sigma_B^{cc} = \sigma_B^M \cdot K_a, \quad (2)$$

где σ_B^M — временное сопротивление мягкой прослойки.

Естественно, что для обеспечения равнопрочности при статической нагрузке требуется как минимум выполнение условия $\sigma_B^{cc} = \sigma_B^T$. В этом случае предельное (минимальное) значение коэффициента контактного упрочнения определяется отношением временных сопротивлений:

$$K_{a\text{пред}} = \sigma_B^T / \sigma_B^M. \quad (3)$$

Используя (1) и (2), найдем предельные значения $a_{\text{пред}}$, при которых достигается равнопрочность соединения в условиях плоской деформации:

$$a_{\text{пред}} = \frac{1}{(2\sqrt{3} K_{a\text{пред}} - \pi)}. \quad (4)$$

Однако необходимо иметь в виду, что повышение прочности сварного соединения с мягкой прослойкой ограничивается истинными напряжениями отрыва для мягкого металла.

При сварке упрочненных сталей ширина разупрочненной зоны зависит от погонной энергии и регулируется выбором подходящего режима сварки. Для каждой толщины металла, способа и режима сварки есть определенная ширина разупрочненного участка, при которой обеспечиваются максимально возможное контактное упрочнение, а также равная прочность сварного соединения и основного металла.

Исследование участка разупрочнения при аргонодуговой и электронно-лучевой сварке металла толщиной 4,5–8 мм показывает:

- твердость на нем определяется только температурой нагрева;
- прочность соединений зависит не от уровня твердости разупрочненного участка, а от его ширины h (рис. 1).

При этом следует учитывать, что участок разупрочнения плавно переходит в более прочные участки зоны термического влияния.

Изучение кинетики и механизма разупрочнения в ЗТВ позволили установить, как на прочность сварных соединений влияют свойства участков, окружающих мягкую прослойку. Экспериментально обоснован новый критерий, определяющий временный предел прочности сварного соединения σ_B^{cc} , — это относительная ширина мягкой прослойки b_1/b_0 . Предложенная эмпирическая зависимость имеет вид:

$$\sigma_B^{cc} = \sigma_B^M + 0,3\sigma_B^M \left(\frac{b_0}{b_1}\right) + 0,3\sigma_B^M \left(\frac{b_0}{b_1}\right)^2, \quad (5)$$

² Матюхин Г. В., Молоков К. А. Прочность и надежность сварных соединений. Владивосток : ДВФУ, 2019. 143 с.

³ Гольдштейн Р. В., Морозов Н. Ф. Механика деформируемого твердого тела: проблемы и результаты // Современные проблемы механики сплошной среды : всерос. конф. памяти академика Леонида Ивановича Седова в связи со столетием со дня его рождения. М. : Торус Пресс, 2009. С. 121–166.

где $\sigma_{вр}^{cc}$ — предел прочности сварного соединения, МПа; σ_B^M — предел прочности мягкой прослойки, МПа; b_0 — ширина прослойки при равной прочности сварного соединения и основного металла, м; b_1 — текущая ширина прослойки, м.

Из последнего уравнения следует, что при $b_0 = b_1$ мягкая прослойка упрочняется максимум на 60 %, т. е. $\sigma_B^T = 1,6\sigma_B^M$, так как дальнейшее упрочнение не имеет смысла.

Результаты экспериментов указывают на снижение выносливости сварных соединений с мягкой прослойкой, образованной после сварки термоупрочненных сталей У4 и У6. Это говорит о существенном снижении несущей способности [10]. У этих сталей пределы выносливости сварных образцов без концентрации напряжений практически совпадают с пределами выносливости таких же образцов из неупрочненной стали. То есть, несмотря на термическое упрочнение сталей (способствующее повышению прочности), вибрационная прочность сварных соединений на базе 10^6 циклов оказывается практически одинаковой. Следовательно, можно предположить, что пластическая деформация в мягких прослойках вызывает раннее образование макротрещины, критический размер которой L_c резко ограничен происшедшими пластическими деформациями.

Трещиностойкость пластически деформированного материала мягкой прослойки до значений $\sigma < \sigma_B^M$ может оцениваться двухпараметрическим критерием разрушения — пределом трещиностойкости, который рассчитывается по известной аналитической зависимости⁴ [2, 11]:

$$K_c = K_{1c} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_B^M}\right)^2}, \quad (6)$$

где σ_c — критическое напряжение разрушения в брутто-сечении; K_{1c} — критический коэффициент интенсивности напряжений (постоянная материала мягкой прослойки).

После пластической деформации мягкой прослойки σ_c будет зависеть от характеристики дефекта. Примем, что эта характеристика — критическая длина L_c зародившейся трещины. Тогда $\sigma_c = K_c / \sqrt{\pi L_c}$. Однако, чтобы воспользоваться (6), необходимо знать степень деформации прослойки, так как от нее в первую очередь будет зависеть K_c . Величину L_c будем считать неизвестной. Ее нужно определить в зависимости от деформации мягкой прослойки.

Авторы работ⁵ [11], исследуя структурный параметр разрушения d и определяя его для дисковидной трещины, приходят к выражению для оценки предела трещиностойкости в одномерном виде:

$$\frac{K_c}{K_{1c}} = \frac{\sqrt{2\eta(1-\eta)}}{\arccos(\eta)}, \quad (7)$$

где $\eta = a/(a+d)$ — безразмерный параметр, заданный диапазоном изменения ($0 \leq \eta \leq 1$); a — радиус дисковидной трещины.

Из последнего равенства следует, что для больших трещин характерно относительно малое значение d , a . Разрушение происходит с малыми пластическими деформациями в нетто-сечении, а $K_c \approx K_{1c}$. Обратная ситуация складывается при относительно небольших трещинах, если для разрушения понадобится большая пластическая деформация в нетто-сечении, и $\eta \approx 0$, $K_c \ll K_{1c}$.

Представим теперь, что мягкая прослойка подвергается циклической нагрузке. В этом случае используем концепцию эффективного порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th0}^e ⁶ для вычисления предельной амплитуды цикла нагружения σ_{fr} при уровне средних напряжений $\sigma_B^M > \sigma_m + \sigma_{fr} > \sigma_T^M$. С этой целью рассчитаем длину начальной макротрещины L , соответствующей предельной амплитуде напряжений в пластически деформированном материале до σ_m :

$$L = \frac{K_{thr}^2}{\pi} \left(\frac{1}{\sigma_{fr}^2} - \frac{1 - \mu + \mu^2}{\sigma_{fc}^2} \right) \quad (8)$$

при $K_{th0} = K_{th0}^e, r = -1$,

⁴ Матохин Г. В., Молоков К. А. Указ. соч.

⁵ Гольдштейн Р. В., Морозов Н. Ф. Указ. соч.

⁶ Молоков К. А. Оценка поврежденности феррито-перлитных сталей в условиях малоциклового нагружения // Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы: сб. тр. конф. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2015. С. 126–129. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25725387>

где σ_{fr} — предельная амплитуда напряжений; σ_{fc} — циклический предел текучести; r — коэффициент асимметрии цикла; μ — коэффициент Пуассона.

Значение длины начальной макротрещины L следует подставить в расчетную зависимость для вычисления предела выносливости [12]:

$$\sigma_{fr} = \sigma_{fc} \left[\pi L \left(\frac{\sigma_{fc}(1-r)}{\Delta K_{thr}} \right)^2 + 0,8 \right]^{-0,5}. \quad (9)$$

Решением будут искомые значения предельных амплитуд. Характеристики, входящие в (9), вычисляются согласно [12] или⁷. Далее не составляет труда определить вклад предварительной пластической деформации мягкой прослойки в эквивалентную поврежденность с позиции оценки длины макротрещины.

Результаты исследования

Построение математической модели. Опишем предлагаемую последовательность разработки аналитических зависимостей. Оставшиеся пластические свойства элемента конструкции или ее части можно оценить по деформации, используя относительное удлинение для области материала. Будем считать, что на малом участке мягкой прослойки имеет место равномерная пластическая деформация. Она связана с критическим относительным удлинением до разрушения $\delta_{5(10)}$ известной зависимостью [13]:

$$e = \ln(1 + \delta_5). \quad (10)$$

Положим, что материал мягкой прослойки пластически деформируется. Рассмотрим случай, когда пластическое деформирование происходит только в первых циклах нагружения. То есть область мягкой прослойки вытягивается пластически под внешней поперечной номинальной нагрузкой, а далее она работает под упругими циклическими напряжениями. Так развивается усталостная трещина. В мягкой прослойке ее может спровоцировать высокая пластическая деформация и (или) дефект. Из-за снижения предельной деформации материала мягкой прослойки предварительное пластическое деформирование приводит к уменьшению критического раскрытия в вершине трещины. По результатам работы [14] можно заметить, что очень близка к линейной зависимость критического раскрытия вершины трещины δ_c (КРТ) при деформации стали вытягиванием. Этот факт наблюдается как для алюминиевого сплава, так и для аустенитной стали. Итоги упомянутых экспериментов позволяют предположить, что при предельной равномерной пластической деформации этих материалов $\delta_c = 0$.

От степени предварительного деформирования существенно зависит предел выносливости. Такую зависимость сложно получить теоретически [15], потому что до области средней предварительной пластической деформации материала предел выносливости достигает минимума, а после возрастает и может достигать показателей как у недеформированного материала. Таким образом, сам факт появления трещины, видимо, играет основную роль в усталости. Нераспространяемые трещины даже при большой предварительной пластической деформации только в редких случаях ведут к разрушению. Это очевидно из примеров повреждений судовых конструкций, приведенных в [1].

Учтем, что $\delta_c = 0$ в пределе пластической деформации, и используем линейную аппроксимацию зависимости $\delta_{1c}(\epsilon)$:

$$\delta(\epsilon) = \delta_{1c} - \left(\frac{\delta_{1c}}{\epsilon_{max}} \right) \epsilon. \quad (11)$$

В вершине трещины КРТ определяется известной зависимостью линейной механики разрушения:

$$\delta_{1c} = \lambda \left(\frac{K_{1c}^2}{E \sigma_T} \right). \quad (12)$$

Коэффициент λ [12] находится по формуле:

$$\lambda = \frac{(1 - 2\mu)^2 E}{1,24 \pi \sigma_T} \left(\frac{q \sigma_T}{R_{mce} D} \right)^{\frac{1}{m} + 1}. \quad (13)$$

Здесь E — модуль упругости материала; R_{mce} — напряжение микроскола деформированного материала; D — коэффициент, учитывающий повышение первой главной компоненты напряжения для случая сложнапряженного состояния; q — коэффициент, показывающий отношение второй главной компоненты напряжений к первой; m — коэффициент упрочнения.

Для указанных характеристик и коэффициентов существуют вполне определенные расчетные зависимости по основным механическим характеристикам материала. Критический коэффициент

⁷ Молоков К. А. Указ соч.

интенсивности напряжений в (12) рассчитывается по формуле:

$$K_{1c} = \sqrt{\left(\frac{R_{mce}D}{q\sigma_T}\right)^{\frac{1}{m}+1} \sigma_T \cdot 6,18\pi d_z}, \quad (14)$$

где d_z — средний диаметр зерна исходного материала мягкой прослойки. Подставим последнее выражение и (13) в (12). Сделаем необходимые сокращения. Учтем, что в (12) и (11) можно пренебречь малой составляющей упругих деформаций. В итоге получим:

$$\delta_{1c}(\varepsilon) = 5(1 - 2\mu)^2 d_z \left(1 - \frac{\varepsilon\sigma_B}{100}\right). \quad (15)$$

Деформация ε вычисляется по зависимости (10). Найдем зависимость $K_{1c}(\varepsilon)$. Из (12) имеем $K_{1c}(\varepsilon) = \sqrt{E\sigma_T\delta_{1c}(\varepsilon)/\lambda}$. Подставим известные выражения и получим:

$$K_{1c}(\varepsilon) = \sqrt{\left(\frac{R_{mce}D}{q\sigma_T}\right)^{\frac{1}{m}+1} 6,18\pi d_z \sigma_T^2 \left(1 - \frac{\varepsilon\sigma_B}{100}\right)} \quad (16)$$

или

$$K_{1c}(\delta) = \sqrt{\frac{0,618\pi d_z 2}{\sigma_T^{\frac{1}{m}-1} (1 - 2\mu)^2} \left(\frac{R_{mce}D}{q}\right)^{\frac{1}{m}+1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_B}{100} \ln(1 + \delta)\right)}. \quad (17)$$

После упрощения можно получить простую зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} от текущей величины δ вытягивания мягкой прослойки:

$$K_{1c}(\delta) = K_c = K_{1c} \sqrt{1 - \frac{\sigma_B}{100} \ln(1 + \delta)}, \quad (18)$$

где δ — удлинение (вытягивание) материала мягкой прослойки, доли.

В формуле (18) $K_{1c}(\delta)$ — предел трещиностойкости K_c . Его относительное значение $K_{1c}(\delta)/K_{1c}$ показывает, как снижение вязкости разрушения материала зависит от удлинения (вытягивания) элементарной области мягкой прослойки. Для простоты расчетов можно использовать усредненное удлинение мягкой прослойки под полезной нагрузкой. Отметим, что локальность пластического удлинения в сварном соединении мягкой прослойки на Δh относительно h может существенно влиять на ее усталостную прочность. Для упрочненного основного материала это влияние, наоборот, будет незначительным (рис. 1).

При $\delta = \delta_5$ отношение K_c/K_{1c} должно давать ноль, поэтому приравняем (18) к нулю и запишем относительно δ расчетную формулу:

$$\delta_5 = \exp(100/\sigma_B) - 1. \quad (19)$$

Здесь σ_B подставляется в МПа.

Анализ результатов и проверка адекватности полученных зависимостей. Можно признать удовлетворительными результаты проверки согласования расчетных характеристик по полученным аналитическим зависимостям со справочными данными конструкционных сталей феррито-перлитного класса в состоянии поставки. Речь идет о тонколистовом прокате из стали Ст10, Ст50, 22К, Ст3сп, 37ХН3А, 30ХГСА и др. (таблица 1).

Таблица 1

Расчетные и справочные характеристики сталей

Сталь	σ_B , МПа	σ_T , МПа	m	d_z , мкм	φ_k	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$	δ_5^* , %	δ_5 , %
Ст10	320	190	0,17	66	0,73	103,6	36,6	> 31
15Г	410	245	0,148	94	0,55	104	26,4	26
Ст3сп	450	270	0,16	37	0,71	101	24,8	25
22К	540	310	0,16	30	0,69	97	20,3	22 ... 26
Ст50	680	350	0,16	25	0,62	78	15,8	17
10ХСНД	540	390	0,132**	27	0,71	—	20,3	19
37ХН3А	1014	743	0,12	7	0,6	73,8	10,3	10
30ХГСА	1750	1360	0,09	3	0,44	53,2***	6	7
30ХГСА	1470	1080	0,12	4	0,6	58,5***	7	7

*Расчет по (19); **расчет по $m = \{0,75 \cdot \lg[\sigma_B(1 + 1,4\varphi_k)/\sigma_{0,2}]\}/\lg[10^5 \cdot \ln(\frac{1}{1-\varphi_k})/(200 + 0,5\sigma_{0,2})]$ [15];
***расчет по (14).

Выполненный ранее анализ [12] подтверждает, что коэффициент λ , рассчитанный по (13) при КРТ в вершине $0,618d_z$, согласуется с экспериментальными данными для сталей 22К и Ст10. В первом случае λ равен 0,22, во втором — 0,23.

Рассмотрим предварительную деформацию тонких листов при плоском напряженном состоянии с условием, что зерно получит относительное удлинение e_z в продольном направлении. В этом случае средний его диаметр в том же направлении будет больше в $(1 + e_z)$ раз, а в поперечном уменьшится в $(\sqrt{1 + e_z})$. То есть, если в продольном направлении средний диаметр возрастет в 2,618 раза, то в поперечном он уменьшится в 1,618 раза. Здесь поперечное направление совпадает с направлением движения трещины. Легко видеть линейность зависимости, по которой определяется увеличение среднего диаметра зерна. Из этого следует, что при равномерном одноосном пластическом деформировании критическое раскрытие в вершине трещины тоже должно снижаться линейно, в зависимости от относительного удлинения e_z . При прокатке стальных листов такой выраженной линейной зависимости не обнаруживается. Очевидно, это связано с поперечными деформациями, для которых характерна приплюснутость зерен.

Диаграммы изменения K_{1c} как функции от δ для сталей (таблица 1) приведены на рис. 2.

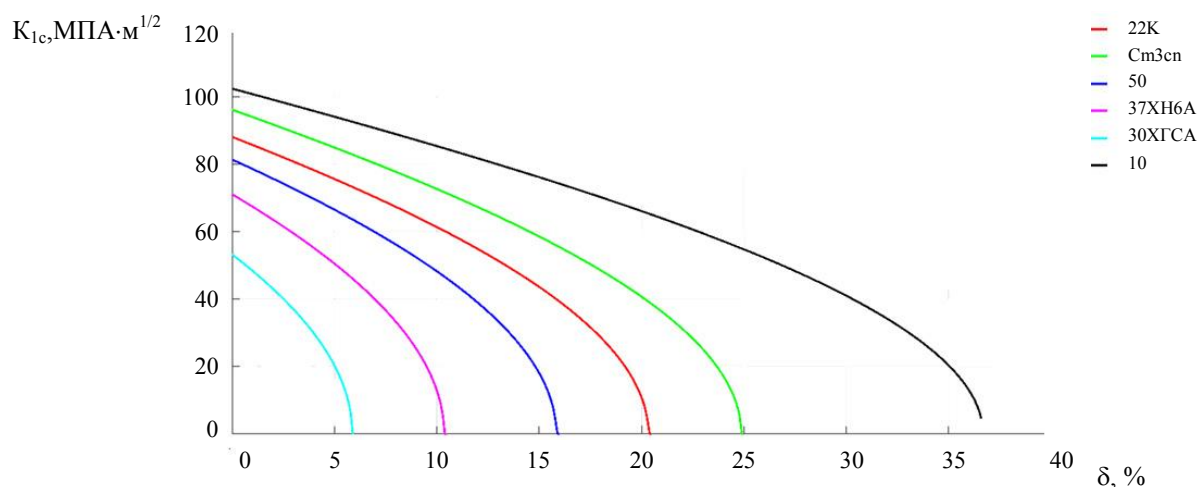


Рис. 2. Изменение трещиностойкости в зависимости от предварительного удлинения сталей

Критический коэффициент интенсивности вычислен по (14) с использованием данных таблицы 1. Это позволяет определить уровень K_{1c} при пластической деформации вытяжкой и сопоставить его со значениями других сталей. Так, сравнение стали 30ХГСА, обработанной на величину предела текучести $\sigma_T = 1360$ МПа, и стали 10 показывает, что при использовании низкопрочной стали 10 уровень K_{1c} можно снизить только при больших деформациях удлинения (около 25 %). На практике в конструкциях так бывает достаточно редко. Однако при целенаправленной вытяжке или холодной прокатке возможно существенное снижение K_{1c} , и это следует учитывать.

Если стали ранжировать по предельной пластичности и сопоставить для них максимальные значения K_{1c} , то окажется, что пластичность убывает от одной марки стали к другой гораздо быстрее, чем меняется критический коэффициент интенсивности напряжений. Так, K_{1c} для сталей 30ХГСА и 10 в исходном состоянии поставки отличается в ~2 раза, а относительное удлинение δ — в ~5 раз. Появление пластичности в вершинах различных концентраторов напряжений неизбежно, поэтому для обеспечения необходимой надежности элементов из стали 30ХГСА целесообразно контролировать пластические деформации в конструкции в ~5 раз точнее. Кроме того, необходимо учитывать, что снижение вязкости в ~2 раза приведет к снижению критической длины трещины в ~4 раза. Причина — низкая вязкость и пластичность стали 30ХГСА, для эксплуатации которой придется в ~5 раз увеличить коэффициент запаса прочности. Последнее не означает, что высокопрочные стали как конструкционный материал хуже сталей средней прочности. Проблема заключается в выборе оптимального сочетания вязкости, пластичности и прочности. Полученные в настоящем анализе расчетные зависимости дают возможность оценить данные характеристики расчетным путем. Это важно для рационального выбора материала на этапе конструирования, определения оптимальных режимов сварки и термообработки.

Сопоставим результаты расчетов по (18) с известной зависимостью (7)⁸ (рис. 3). Первая функция зависит от оставшейся пластичности стали, а вторая — от относительной длины трещины в концепции

⁸ Гольдштейн Р. В., Морозов Н. Ф. Указ. соч.

структурного элемента. Чтобы удобно представить результаты для их сравнения, введем безразмерный параметр:

$$\eta^* = 1 - a/(a + d). \quad (20)$$

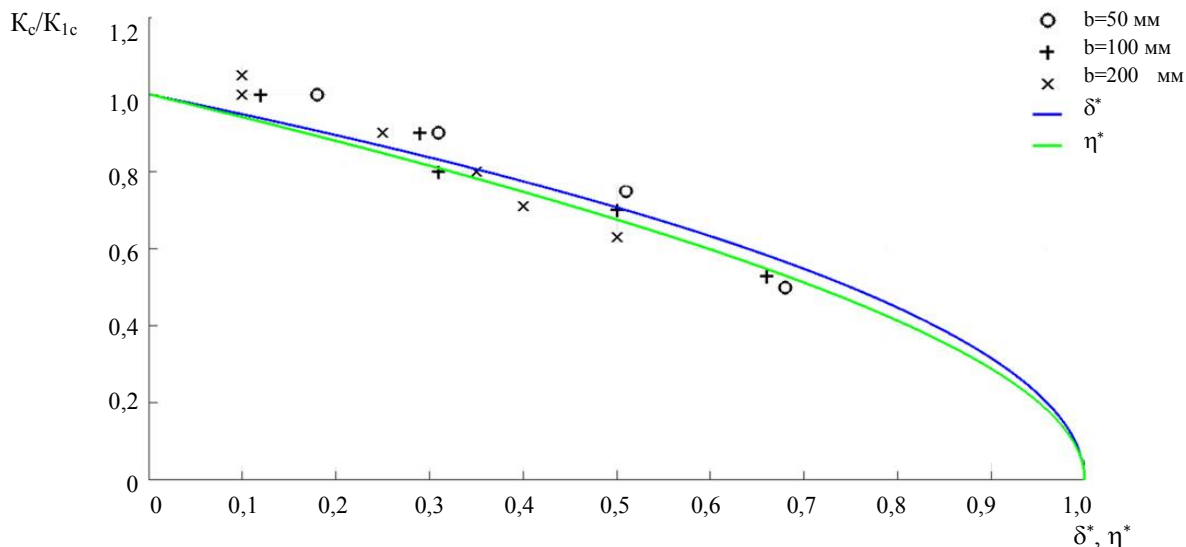


Рис. 3. Зависимости относительного предела трещиностойкости от безразмерного параметра дисковидной трещины η^* и от безразмерного параметра предварительного равномерного удлинения материала δ^* . Линии — аналитические зависимости (7), (18). Маркеры — экспериментальные данные для компактного образца⁹ [11, 16] с размерами b

После подстановки (20) в (7) получаем инвариантное выражение для среднего значения. Если известно η^* , то можно найти отношение $a/(a + d)$ по (20). Результаты сравнения показывают, что функции практически совпадают. В относительных координатах для них характерна инвариантность с хорошим приближением. Обе функции хорошо аппроксимируют экспериментальные данные предела трещиностойкости, полученного на образцах с характерными размерами b [13].

Рассмотрим условия плоской деформации при известной критической длине трещины L_c . Для феррито-перлитных сталей с $\sigma_T < 400$ МПа ее приближенно можно оценить как $L_c = 2K_{Ic}^2/\pi/\sigma_T^2$ и легко найти критическое напряжение внешней нагрузки $\sigma_c = K_c/\sqrt{\pi L_c}$:

$$\sigma_c = \sigma_T \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sigma_B}{200} \ln(1 + \delta)}. \quad (21)$$

Уравнение отражает закон уменьшения критических напряжений σ_c ниже значения предела выносливости материала с длиной трещины L_c в зависимости от величины предварительного удлинения материала. В этой же постановке снижение критической длины трещины в предварительно деформированном материале мягкой прослойки можно оценить по зависимости:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2 \left(1 - \frac{\sigma_B}{100} \ln(1 + \delta) \right), \quad (22)$$

где L — половина длины для сквозной трещины; σ — критическое напряжение для катастрофического распространения трещины длиной L .

При $\sigma = \sigma_{-1}$ из (22) следует, что длина L катастрофического распространения трещины прямо пропорциональна значению $\left(1 - \frac{\sigma_B}{100} \ln(1 + \delta) \right)$ и константе материала мягкой прослойки L_c .

Полученные зависимости в системной совокупности представляют предлагаемую математическую модель оценки трещиностойкости сварных соединений с мягкими прослойками.

Обсуждение и заключение. При сварке термоупрочненных сталей для корпусных и других листовых конструкций образуются мягкие прослойки, металл которых пластически деформируется в первых циклах нагружения. Методами численного анализа с применением САЕ-средств¹⁰ можно определить деформации или увеличение ширины мягкой прослойки сварного соединения под действием рабочих нагрузок. Надежность работы соединения с мягкой прослойкой зависит от степени пластической деформации, ее упрочнения, жесткости напряженного состояния с учетом приграничных зон твердых прослоек, а при появлении трещины

⁹ Матюхин Г. В., Молоков К. А. Указ. соч.

¹⁰ САЕ (от англ. computer-aided engineering — компьютерная инженерия). Так называют программы и программные системы для решения инженерных задач.

— от ее критической длины L . При вытягивании мягкой прослойки L снижается прямо пропорционально константе материала мягкой прослойки L_c и выражению, зависящему от степени вытягивания δ , т. е. от относительного предварительного удлинения.

Получена простая аналитическая зависимость критического относительного удлинения до разрушения (19). Она обеспечивает результаты расчетов, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для большинства конструкционных сталей (по состоянию поставки). Формула позволяет оценить справочную характеристику δ_5 образца по единственному известному параметру — временному пределу прочности. Для данной зависимости характерна теоретическая закономерность, которая хорошо согласуется с параметрами конструкционных сталей. Однако в некоторых случаях (специальные режимы термообработки или отпуска) она может дать относительную погрешность до $\sim 30\text{--}40\%$.

Предложена аналитическая зависимость изменения предела трещиностойкости мягкой прослойки от ее предварительного пластического деформирования. Сопоставлены:

- расчетные значения предела трещиностойкости;
- экспериментальные данные, полученные на компактных образцах для испытаний;
- более ранние аналитические решения.

Результаты сравнения убедительно доказывают применимость предложенного аналитического решения. Рассмотрено действие закона снижения предела трещиностойкости при относительном предварительном пластическом удлинении вплоть до разрушения (δ_5) и изменении параметра (η^*) предварительно выращенной трещины в материале вплоть до L_c . Для данного случая установлена инвариантность в относительных координатах при условии плоской деформации и отсутствия влияния ограниченности размеров образца или конструкции. Учет ограниченности размеров образцов и разных схем нагружения существенно меняет упомянутую зависимость¹¹ [13, 17].

Предложенный метод оценки предела трещиностойкости сварных элементов с мягкими прослойками может быть использован в инженерных машиностроительных расчетах по минимизации металлоемкости, а также для корабельных конструкций, подверженных малоцикловой усталости.

Библиографический список

1. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций / В. В. Новиков, Г. П. Турмов, О. Э. Суров [и др.]. — Владивосток : ДВФУ, 2020. — 266 с.
2. Махутов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. — Москва : Машиностроение, 1981. — 272 с.
3. Компьютерное моделирование контактного упрочнения алюминиевой прослойки магниево-алюминиевых цилиндрических сосудов / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, И. А. Пономарева, В. Н. Арисова // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. — 2015. — № 4 (14). — С. 12–16.
4. Айметов, С. Ф. Прочность стыковых сварных соединений, ослабленных мягкой прослойкой, при действии изгибающей нагрузки / С. Ф. Айметов, Ф. Г. Айметов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — 2015. — Т. 15, № 1. — С. 107–112. — (Металлургия).
5. Влияние неоднородности механических свойств различных зон сварного стыкового соединения на работу соединения в упругопластической стадии деформации / В. И. Берг, М. Н. Чекардовский, С. В. Якубовская, В. С. Торопов // Современные проблемы науки и образования : [сайт]. — 2015. — № 2/3. — 28 с. — URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23518> (дата обращения: 11.02.2021).
6. Кулиев, В. Д. Разрушение многослойных материалов с усталостной трещиной / В. Д. Кулиев, Ю. В. Зайцев, П. С. Султыгова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2014. — № 3 (29). — С. 162–166.
7. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями / К. А. Молоков, В. В. Новиков, Г. П. Турмов, Н. П. Васильченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1, № 3 (41). — С. 45–54.
8. Молоков, К. А. Оценка поврежденности феррито-перлитных сталей при перегрузках / К. А. Молоков, А. В. Славгородская // Морские интеллектуальные технологии. — 2013. — № 2. — С. 56–58.
9. Бирдегулов, Л. Р. Исследование трещиностойкости металлов / Л. Р. Бирдегулов, А. М. Щипачев // Juvenis scientia. — 2016. — № 2. — С. 28–32.
10. Аснис, А. Е. Динамическая прочность сварных соединений из малоуглеродистой и низколегированной сталей / А. Е. Аснис. — Москва ; Киев : Машгиз, 1962. — 171 с.

¹¹ Гольдштейн Р. В., Морозов Н. Ф. Указ. соч.

11. Матвиенко, Ю. Г. Двухпараметрическая механика разрушения / Ю. Г. Матвиенко. — Москва : Физматлит, 2021. — 208 с.
12. Матохин, Г. В. Оценка ресурса сварных конструкций из феррито-перлитных сталей / Г. В. Матохин. — Владивосток : ДВГТУ, 2001. — 202 с.
13. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Отв. ред. Н. А. Махутов. — Москва : Либроком, 2008. — 576 с.
14. Зоны локализации пластической деформации в предварительно деформированных тонколистовых пластичных материалах / В. Ю. Гольцев, А. В. Зеленский, О. Г. Кудрявцев, Ю. Г. Матвиенко // Исследование прочности материалов и конструкций атомной техники. — Москва : Энергоатомиздат, 1984. — С. 68–73.
15. Научные основы повышения малоциклового прочности / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин [и др.] ; под ред. Н. А. Махутова. — Москва : Наука, 2006. — 623 с.
16. Сосновский, Л. А. Трещиностойкость / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович. — Гомель : БелГУТ, 2011. — 366 с.
17. Математические модели оценки эксплуатационного ресурса и работоспособности судовых сварных конструкций / К. А. Молоков, В. В. Новиков, Г. П. Турмов, А. С. Владимирович. — Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2021. — 240 с.

Поступила в редакцию 20.09.2021

Поступила после рецензирования 10.10.2021

Принята к публикации 24.10.2021

Об авторах:

Молоков Константин Александрович, доцент департамента промышленной безопасности Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), доцент кафедры информационных технологий и систем ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса» (690014, РФ, Приморский край, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41) кандидат технических наук, [Scopus](#), [ORCID](#), [Researcher](#), Spektrum011277@gmail.com

Новиков Валерий Васильевич, доцент департамента морской техники и транспорта Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690091, РФ, Владивосток, ул. Суханова, 8), кандидат технических наук, [Scopus](#), [ORCID](#), leka1551@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

К. А. Молоков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; В. В. Новиков — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка выводов, корректировка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 678.549

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327>

Влияние температуры жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах



И. Р. Антибас¹ , А. Г. Дьяченко¹ , Саед Бакир Имад² 

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

²Университет Алеппо (г. Алеппо, Сирийская Арабская Республика)

✉ Imad.antypas@mail.ru

Введение. Снабжение людей качественной питьевой водой всегда имело первостепенное значение. Но её транспортировка по трубопроводным системам зачастую бывает связана с проблемами, вызываемыми, например, температурой воды и окружающей среды, а также возможностью возникновения гидравлических ударов на отдельных участках труб. В большей степени эти проблемы касаются систем, в которых используются трубы из полиэтилена. Температура — это один из наиболее важных факторов, влияющих на гибкость полиэтиленовых труб, и этот фактор оказывает влияние не только на проектирование водопроводных сетей, но и на капиталовложения в их развитие. Целью настоящих исследований явилось изучение влияния температуры воды и окружающей среды на свойства материала труб и скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах.

Материалы и методы. В проведенных авторами опытах применялся метод натурных исследований, когда для испытания используются специализированное оборудование и специально изготовленные для этих целей образцы. В данном случае использовались образцы труб из полиэтилена высокой плотности, которые подвергались испытаниям на растяжение на разрывной машине, причём каждый опыт проводился троекратно. В процессе проведения опытов образцы подвергались воздействию определённых температурных режимов (как внешних, так и внутренних), при этом исследовалось также влияние гидродинамического давления жидкости в трубе в результате изменения скорости жидкости в её секциях. Для этого в образцы подавалась жидкость под определённым давлением, чтобы выяснить влияние на трубы эффекта, известного как гидроудар.

Результаты исследования. В ходе исследования было установлено, что значение модуля упругости полиэтилена высокой плотности РЕ100 уменьшается с повышением температуры воды, причём величина снижения при температуре 60 °С достигает 60,21 % по сравнению с его значением при температуре воды +4 °С. В результате опытов по определению изменения модуля упругости полиэтилена с повышением температуры было выведено экспоненциальное уравнение для расчета значения полиэтиленового коэффициента как функции времени $E = 1,312e^{-0,01t}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,988$, а для расчета значения скорости распространения гидравлической ударной волны было выведено экспоненциальное уравнение как функции времени $C = 275,9e^{-0,01t}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,987$.

Обсуждение и заключения. В результате экспериментов было установлено, что вредное воздействие на стенки труб оказывает такое явление, как гидроудар, возникновение которого по возможности необходимо избегать ещё на этапе проектирования водопроводной сети. В ходе исследования было определено, что с увеличением температуры значения модуля упругости полиэтилена уменьшались при одновременном понижении значений скорости распространения гидравлической ударной волны.

Ключевые слова: полиэтиленовые трубы, температурный диапазон, гидроудар.

Для цитирования: Антибас, И. Р. Влияние температуры жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Саед Бакир Имад // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 319–327. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327>

© Антибас И. Р., Дьяченко А. Г., Имад Саед Бакир, 2021



Liquid temperature effect on the hydraulic shock wave velocity in polyethylene pipes

I. R. Antypas¹ , A.G. Dyachenko¹ , Saed Bakir Imad² 

¹ Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

² University of Aleppo (Aleppo, Syria)

✉ Imad.antypas@mail.ru

Introduction. Providing people with high quality drinking water has always come first. However, its transportation through pipeline systems was often associated with some problems, such as the temperature of the water and the environment, as well as the possibility of water hammer on certain pipe sections. This was especially true for systems that use polyethylene pipes. Temperature is a key factor affecting the flexibility properties of polyethylene pipes, and it affects not only the design, but also the investment in the development of water supply networks. The purpose of these studies was to study the effect of water and ambient temperature on the density, properties of the pipe material and the speed of propagation of a hydraulic shock wave in polyethylene pipes.

Materials and Methods. In the experiments performed, the method of field research was used, when tests are carried out on specialized equipment on samples specially made for the pursued purposes. Here, samples of high-density polyethylene pipes were used, which were subjected to tensile tests on a tensile testing machine, and each experiment was carried out three times.

In the course of the experiments, the samples were exposed to certain temperature regimes (both external and internal), while the influence of the hydrodynamic pressure of the liquid in the pipe was also investigated, as a result of the change in time of the liquid velocity in its sections. To do this, the samples were supplied with liquid under a certain pressure in order to find out the influence on the pipes of an effect known as water hammer.

Results. In the course of the research, it was found that the value of the elastic modulus of high-density polyethylene PE100 decreases with increasing water temperature, and the decrease at a temperature of 60° C reaches 60.21% compared to its value at a water temperature of +4° C. Based on the results of experiments to determine the effect of the elastic modulus of polyethylene with increasing temperature, an exponential equation was derived to calculate the value of the polyethylene coefficient as a function of time $E = 1.312e^{-0.01t}$ with the correlation coefficient $R^2 = 0.988$; and based on the results of the studies carried out to calculate the value of the propagation velocity of a hydraulic shock wave, an exponential equation was derived as a function of time $C = 275.9e^{-0.01t}$ with the coefficient correlation $R^2 = 0.987$.

Discussion and Conclusions. In the course of the research, it was found that such a phenomenon as water hammer has a harmful effect on the pipe walls, which, if possible, should be avoided even at the design stage of the water supply network. During the experiments, it was found that with an increase in temperature, the values of the elastic modulus of polyethylene decreased with a simultaneous decrease in the values of the propagation velocity of the hydraulic shock wave.

Keywords: polyethylene pipes, temperature range, water hammer.

For citation: I. R. Antypas, A. G. Dyachenko, Saed Bakir Imad. Liquid temperature effect on the hydraulic shock wave velocity in polyethylene pipes. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 319–327. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327>

Введение. Температура протекающей жидкости и температура окружающей среды оказывают существенное влияние на свойства материала труб, изготовленных из полиэтилена высокой плотности. При повышении температуры материал трубы становится более гибким, что приводит к снижению скорости распространения гидравлической ударной волны, а значит, и к снижению давления. Промышленно изготовленные полиэтиленовые трубы из PE100 (HDPE) являются термопластами, так как их пластичность варьируется в соответствующих пределах, зависящих от рабочих условий. Эти пластмассы имеют ряд преимуществ, в том числе сравнительно небольшой удельный вес, они дают возможность работать при низких температурах, способны выдерживать умеренное давление, обладают высокой коррозионной устойчивостью (особенно к кислотам и щелочам), хорошими электроизоляционными свойствами, легко окрашиваются и просты при установке. Они изготавливаются сразу большой длины, что сокращает при их прокладке количество соединительных элементов, которые считаются дорогими и хрупкими и вызывают проблемы,

связанные с утечками [1–6]. Полиэтиленовые трубы относятся к гидравлически гладким трубам, в которых потери энергии на трение в процессе протекания жидкости намного меньше, чем в металлических трубах, что приводит к экономии энергии перекачивания. Эти трубы характеризуются очень малым диапазоном шероховатости ($k=0,001–0,008$ мм), что в 3–20 раз меньше шероховатости новых стальных труб. Температура является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства гибкости полиэтиленовых труб, и этот фактор не только влияет на проектирование и капиталовложения в различные сети снабжения питьевой водой при стабильности потока, но и вызывает нестабильное его течение в виде гидроудара в полиэтиленовых трубах [7–10]. Международные стандарты определяют свойства полиэтиленовых труб в сетях питьевого водоснабжения при температуре 20–23 °С, в то время как европейские стандарты определяют их при температуре 10 °С. Модуль упругости полиэтиленовых труб относительно велик при низких температурах водного потока, значение его понижается, когда при гидравлическом ударе температура потока повышается. Поэтому гидравлический удар может оказывать значительное влияние на стенки полиэтиленовых труб в сетях питьевого водоснабжения [11–14]. Цель настоящих исследований — изучение влияния температуры жидкости и температуры воздуха, окружающего полиэтиленовые трубы, на плотность, другие свойства материала труб и на скорость распространения в них гидравлической ударной волны.

Методы и материалы исследования. Гидравлический удар. Гидравлическим ударом называют увеличение или уменьшение гидродинамического давления жидкости в трубе в результате изменения скорости жидкости в её секции. Этот удар может создавать большое давление, которое необходимо учитывать при расчете толщины стенок трубы. Сжимаемость жидкости и склонность стенок трубы к деформации придают гидравлическому удару упругость, поскольку он представлен в виде волн давления, распространяющихся по трубе в нестабильном потоке. Различают два типа гидроудара:

1. Прямой гидравлический удар опасен и возникает, когда время остановки меньше периода гидравлической волны, $t_c < t_0$.

2. Косвенный гидравлический удар, который не опасен и срабатывает, когда время отключения больше периода гидравлической волны, $t_c > t_0$:

$$t_0 = 2L / C_j, \quad (1)$$

где t_0 — период гидравлической волны, с; L — длина трубы, м; C_j — скорость распространения гидравлической ударной волны, м/с; t_c — время закрытия или открытия клапана, с.

Прямой гидравлический удар возникает, когда на конце трубы внезапно открывается или закрывается клапан, соединенный с широкой поверхностью резервуара, или внезапно прекращается подача электроэнергии на насосную станцию. Изменение давления в результате прямого гидравлического удара определяется соотношением Жуковского-Леви:

$$\Delta P_{\max} = \rho_j \cdot C_j \cdot V_0, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\max}$ — величина изменения высокого или низкого давления, Н/м²;

ρ_j — плотность жидкости при установившемся расходе, кг/м³; C_j — скорость распространения гидравлической ударной волны, м/с; V_0 — установившаяся скорость потока жидкости в трубе, м/с.

Что касается непрямого гидравлического удара, то он возникает при медленном открытии или закрытии клапана на конце трубы, соединенной с широкой поверхностью резервуара, или при увеличении времени остановки работы насосной группы на насосной станции. Величина изменения давления в результате непрямого гидравлического удара определяется следующим соотношением:

$$\Delta P_{\max} = 2\rho_j \cdot L \cdot V_0 / RT_c. \quad (3)$$

Величина скорости распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах определяется по следующей формуле:

$$C_j = \frac{\sqrt{\frac{E_{0j}}{\rho_j}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E_{0j}}{E_j} M}}, \quad (4)$$

где M — постоянная консолидации при $D/e > 40$

Для поддержки одной стороны трубы $M = 1,25 - \mu$, $M = 1 - \mu/2$, всей трубы — $M = 1 - \mu^2$; для труб без опоры (с компенсаторами) — $M=1$. Здесь μ — модуль Пуассона, составляет 0,45 для труб из HDPE [3–4]; E_{0j} — коэффициент упругости воды, Н/м²; ρ_j — плотность воды, кг/м³; D — внутренний диаметр трубы, м.

Скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах находится в диапазоне 180–370 м/с [1, 9]. В таблице 1 представлены данные о физических свойствах воды при атмосферном давлении на её поверхности. На рис. 1 показано уменьшение плотности воды с увеличением температуры, а на рис. 2 — увеличение значения модуля упругости воды с повышением её температуры.

Таблица 1

Физические свойства воды при атмосферном давлении на её поверхности

Температура, °C	0	4	10	20	30	40	50	60
Плотность воды, кг/м ³	999,8	1000	999,7	998,2	995,7	992,2	988	983,2
Модуль упругости воды, ГН/м ²	2,02	2,06	2,1	2,18	2,25	2,28	2,29	2,28

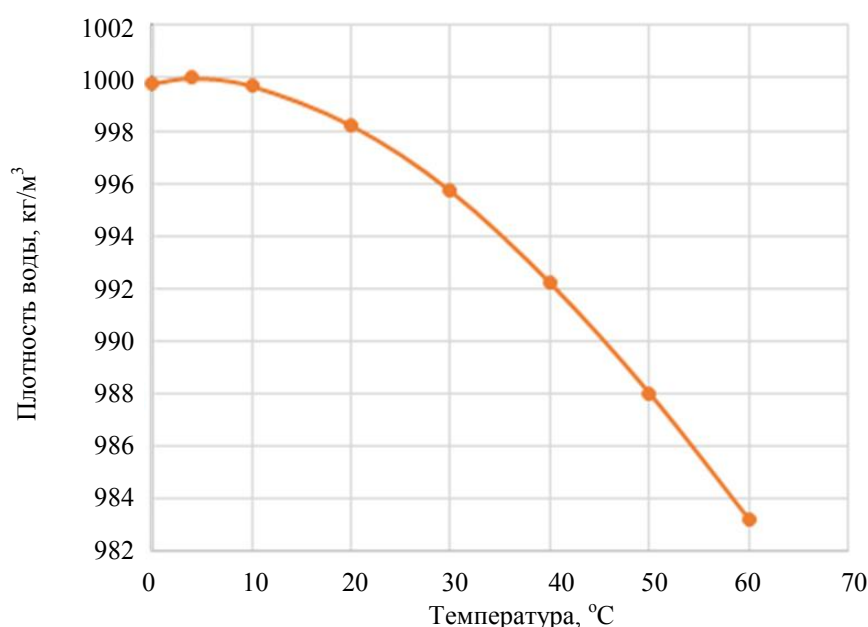


Рис. 1. Изменение плотности воды с повышением температуры

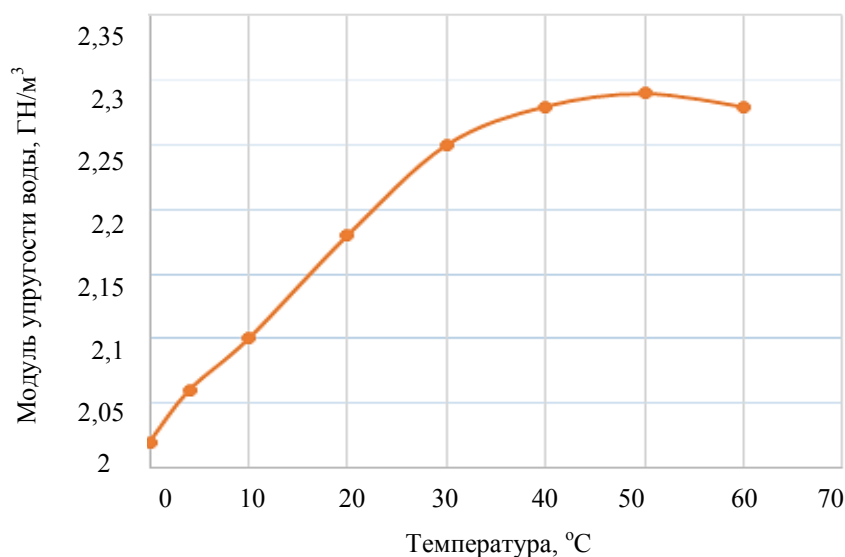


Рис. 2. Зависимость значений модуля упругости воды от температуры

В таблице 2 приведен модуль упругости материала трубы из полиэтилена при 16 °С [2, 10].

Таблица 2

Модуль упругости материала трубы из полиэтилена при температуре 16 °С

Модуль упругости полиэтилена, lb/in ²	Модуль упругости полиэтилена, МН/м ²	Модуль упругости полиэтилена, lb/ft ²
150 000	1 030	22 000 000

Лабораторные испытания. Из полиэтиленовой трубы высокой плотности HDPE был изготовлен 21 образец. В ходе проведенных испытаний были измерены значения определенных характеристик, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Технические характеристики труб из HDPE

D, mm	e _{min} , mm	e _{max} , mm	PE	SDR	PN, MPa
110	6,6	7,4	100	17	1

Для проведения исследований были выполнены следующие действия:

- выбраны и приняты значения температур, при которых производились испытания: 4, 10, 20, 30, 40, 50, 60 °С;
- для каждой из выбранных температур испытывалось по три образца;
- в ходе испытаний определялись физико-механические характеристики, средние значения которых приведены в таблице 4;
- образцы на растяжение нагревали в течение часа в цифровой электрической печи, затем растягивали с помощью специального устройства, полученные результаты представлены в таблице 4 и на рис. 3;
- полиэтиленовую трубку диаметром 110 мм заполняли водой при определенных температурах до момента её разрыва и рассчитывали относительную деформацию по формуле $\varepsilon = \Delta D / D$ (таблица 4).

Изменения упругих растягивающих напряжений в образцах труб из полиэтилена с внешним диаметром 110 мм при номинальном давлении 10 Бар и их деформации, измеренные при выбранных ранее температурах, анализировались в течение года. Полученные данные представлены в таблице 5 и на рис. 4.

Таблица 4

Максимальные значения упругих растягивающих напряжений
и относительной деформации образцов из полиэтилена в соответствии
с утвержденными температурами

Температура, °С	4	10	20	30	40	50	60
Средние значения упругих напряжений, МПа	29,576	26,074	23,656	22,340	19,716	18,426	17,229
Средние значения относительной деформации, %	0,0218	0,0226	0,0256	0,0275	0,0293	0,0306	0,0319

Таблица 5

Максимальные значения изменения упругих растягивающих напряжений для образцов из полиэтилена в зависимости от изменения температуры в течение года

Месяцы	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Упругие напряжения, МПа	28,16	31,30	26,49	26,01	24,71	24,64
Месяцы	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Упругие напряжения, МПа	23,32	22,02	24,20	24,27	25,40	27,57

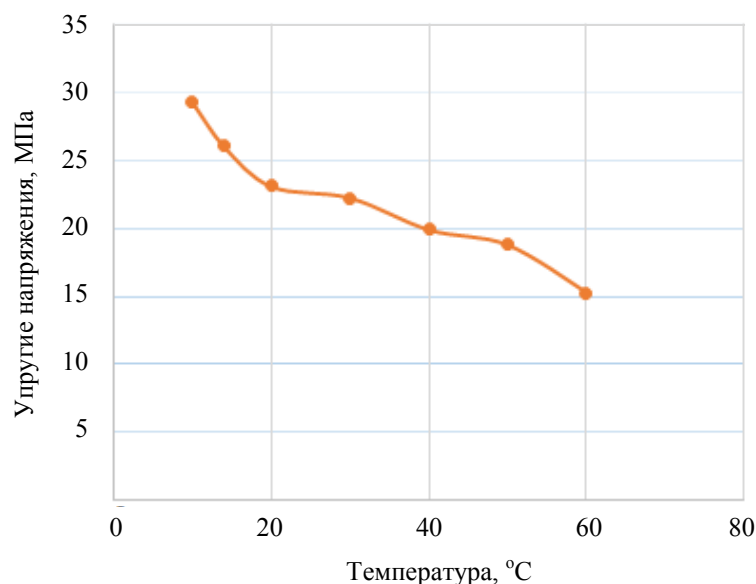


Рис. 3. Напряжения при растяжении полиэтилена при повышении температуры

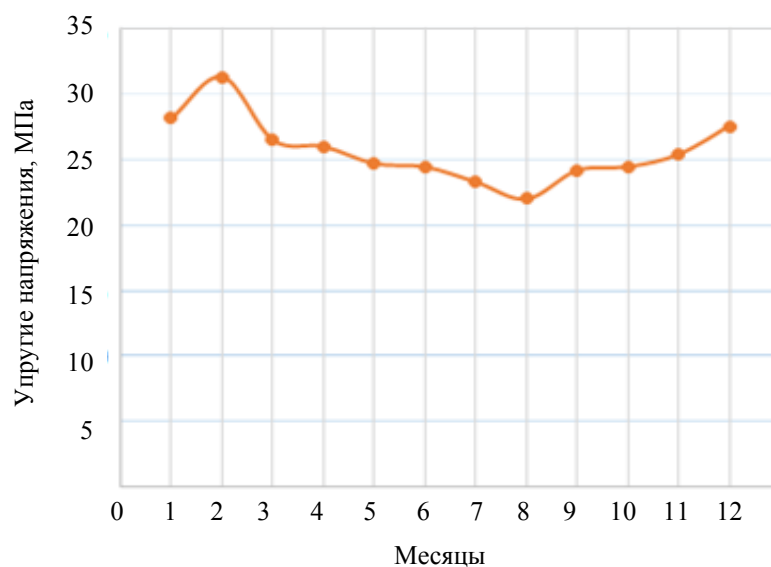


Рис. 4. Значения напряжений при растяжении образцов из полиэтилена в течение года

Результаты. Результаты обрабатывались по закону Гука следующим образом:

$$\varepsilon = \Delta D / D = \sigma / E, \quad (5)$$

где ε — относительная деформация; ΔD — изменение диаметра трубы, мм; D — диаметр трубы, мм; σ — напряжения растяжения в стенке трубы, МПа; E — модуль Юнга, МПа;

В таблице 6 приведены значения модуля упругости полиэтилена РЕ 100 и скорости распространения гидравлической ударной волны при выбранных температурах.

На рисунке 5 показано уменьшение значения модуля упругости полиэтилена с увеличением температуры, а на рис. 6 — уменьшение значения скорости распространения гидравлической ударной волны с увеличением температуры.

Таблица 6

Значения модуля упругости полиэтилена РЕ 100 и скорости распространения гидравлической ударной волны при утвержденных температурах

Температура (°C)	4	10	20	30	40	50	60
Модуль упругости, E (МПа)	1357	1154	924	812	673	602	540
Скорость гидравлической ударной волны, C (м/с)	280	259	233	219	200	190	180

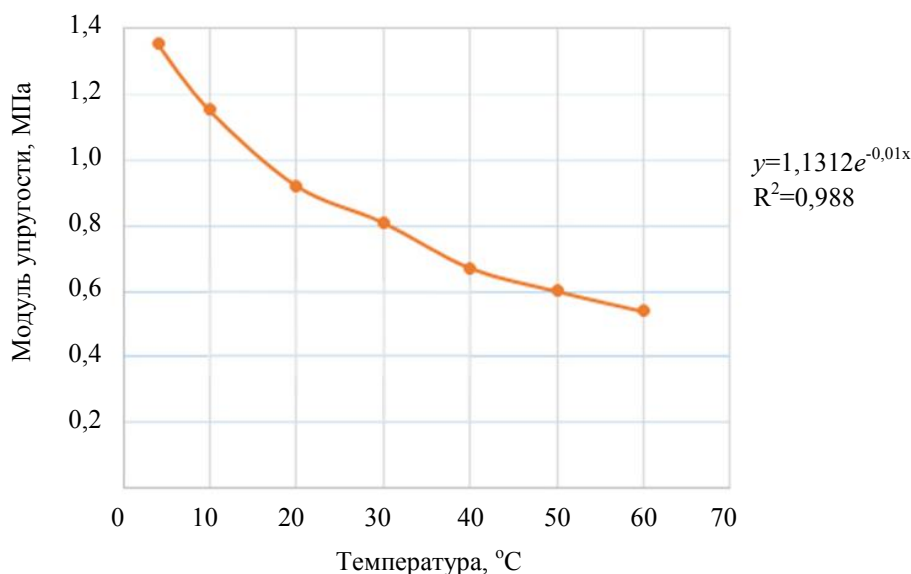


Рис. 5. Значения модуля упругости полиэтилена при повышении температуры

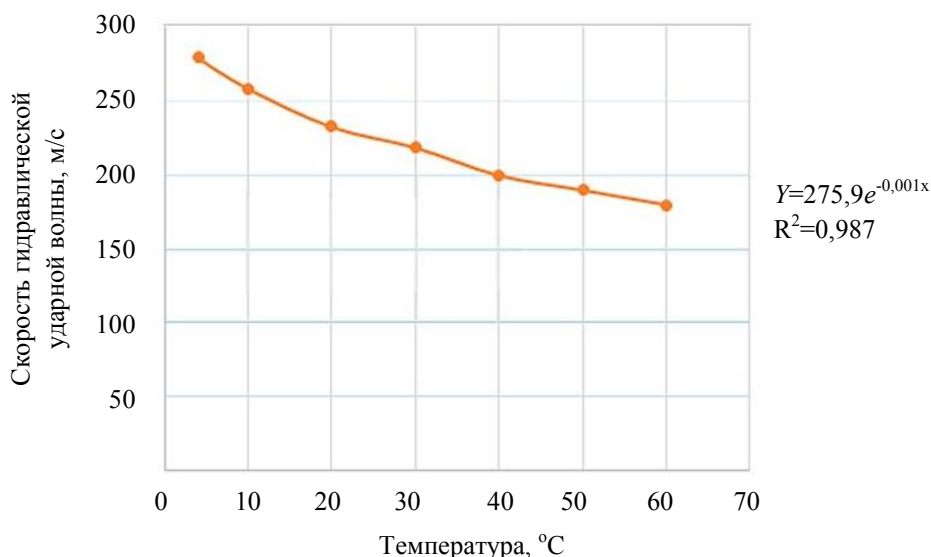


Рис. 6. Значения скорости распространения гидравлической ударной волны при повышении температуры

Обсуждение и заключения

На основании полученных данных, представленных на рис. 5, авторами выведено экспоненциальное уравнение для расчета значения коэффициента упругости полиэтилена как функции времени $E = 1,312e^{-0,01t}$. Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет $R^2 = 0,988$.

На основании данных, представленных на рис. 6, получено экспоненциальное уравнение для расчета значения скорости распространения гидравлической ударной волны как функции времени $C = 275,9e^{-0,001t}$. Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет $R^2 = 0,987$.

Проведя анализ результатов, полученных в ходе исследований, можно сделать следующие выводы:

- высокая температура воды оказывает существенное влияние на свойства материала труб из полиэтилена высокой плотности РЕ 100 и на гидравлические свойства ударной волны;
- значение модуля упругости полиэтилена высокой плотности РЕ 100 уменьшается с повышением температуры воды. Например, при повышении температуры от 4 до 60°C снижение значения модуля упругости достигает 60 %. Это приводит к значительному снижению скорости распространения гидравлической ударной волны. Величина снижения достигает порядка 35 %, что ведет к заметному снижению значения максимального изменения давления в результате гидравлического удара.

Библиографический список

1. Li Chao. The Research Status of the Wetting of Metal/Ceramic in the High Temperature Self-Lubricating Materials / Li Chao, Wang Yan Jun, Qin Ke, et al. // International Journal of Materials Science and Applications. — 2016. — Vol. 5. — P. 108–112. [10.11648/j.ijmsa.20160502.22](https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20160502.22)
2. Amer Karnoub. Investigation of the impact behavior for composite materials reinforced by glass fibers / Amer Karnoub, Hajian Huang, Imad Antypas // Journal of Physics: Conference Series. Engineering and Innovative Technologies. — 2020. — Vol. 1515 — Art. 042081. [10.1088/1742-6596/1515/4/042081](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042081)
3. Antypas, I. R. The influence of polyethylene processing on the plastic containers blowing / I. R. Antypas // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1515. — Art. 042042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042042>
4. Qingquan Lai. Enhanced wetting of dual-phase metallic solids by liquid metals: A new effect of interfacial reaction / Qingquan Lai, Lei Zhang, N. Eustathopoulos // Acta Materialia. — 2013. — Vol. 61, P. 4127–4134. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.039>
5. Buckens, A. Recycling of WEEE plastics: a review / Alfons Buckens, Jie Yang // Journal of material Cycle and Waste Management. — 2014. — Vol. 16. — P. 415–434.
6. Antypas, I. R. Improvement of mechanical behavior of neoprene rubber by means of glass fiber / I.R. Antypas // Journal of Physics: Conference Series. Engineering and Innovative Technologies. — 2021. — Vol. 1889. — Art. 042007.
7. Wuyi Wan. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection / Wuyi Wan, Wenrui Huang, Cong Li // Journal of Pressure Vessel Technology. — 2014. — Vol. 136. — Art. 011303. <https://doi.org/10.1115/1.4025829>
8. Yan Gao. Simplified dispersion relationships for fluid-dominated axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes / Yan Gao, Fusheng Sui, Jennifer M. Muggleton, et al. Journal of Sound and Vibration. — 2016. — Vol. 375. — P. 386–402. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.012>
9. Jinzhe Gong. Detecting thinner-walled pipe sections using a spark transient pressure wave generator / Jinzhe Gong, Martin F. Lambert, Si T. N. Nguyen, et al. // Journal of Hydraulic Engineering. — 2018. — Vol. 144. — P. 1–8. [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001409](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001409)
10. Lars-Eric Janson. Plastics pipes for water supply and sewage disposal / Lars-Eric Janson. — Stockholm: Borealis, 2003. — 404 p.
11. Twyman, J. Wave Speed Calculation For Water Hammer Analysis / John Twyman. — Obras y Proyectos. — 2016. — Vol. 20. — P. 86–92.
12. Espinoza-Moreno, G. Effect of the Temperature in Negative Pressure Wave Methods for Real Time Leak Location Applied to Plastic Water Pipelines / G. Espinoza-Moreno, O. Begovich // Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA. — Mexico: Cancún, Quintana Roo, 2014. — P. 564–569.
13. Chadwick, A. Hydraulics in civil and environmental engineering / Andrew Chadwick, John Morfett, Martin Borthwick. — CRC Press, 2021. — 652 p. [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:9\(724\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:9(724))
14. Wei-Li Wu. High density polyethylene film toughened with polypropylene and linear low density polyethylene / Wei-Li Wu, Yi-Wen Wang // Materials Letters. — 2019. — Vol. 257. — Art. 126689. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126689>

Поступила в редакцию 04.10.2021

Поступила после рецензирования 25.10.2021

Принята к публикации 03.11.2021

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [Scopus](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), [Researcher](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [Scopus](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), alexey-a2@mail.ru

Саед Бакир Имад, доцент кафедры «Сельскохозяйственное машиностроение» Университета Алеппо (САР, г. Алеппо, Университет Алеппо, механический факультет), доктор технических наук, доцент, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9142-1000), bakir-111@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Р. Антибас и Саед Бакир Имад — научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения, компьютерная реализация решения задачи; А. Г. Дьяченко — анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.179.17

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336>

Применение и оценка технического состояния композиционных материалов в летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля



А. В. Попов , А. О. Самуйлов , И. С. Черепанов 

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж, Российская Федерация)

✉ veselova.27@icloud.com

Введение. В статье проведен анализ применения композиционных материалов, как основного определяющего способа уменьшения массы планера летательного аппарата и беспилотного летательного аппарата. Перспективные методы неразрушающего контроля позволяют оценить техническое состояние данных материалов, а также с высокой точностью определить концентраторы напряжений на планере летательного аппарата и беспилотного летательного аппарата с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации данного объекта контроля.

Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости композиционных материалов путем применения акустико-эмиссионного контроля.

Материалы и методы. Приведена номенклатура применяемых композиционных материалов при строительстве различных летательных аппаратов, в том числе беспилотных, представлены наиболее возможные вероятные дефекты данных материалов вследствие влияния эксплуатационных факторов. Произведено сравнение применяемых методов неразрушающего контроля композиционного материала и выборка наиболее подходящего согласно специфическим преимуществам. Проведен эксперимент по определению пределов прочности углепластика при помощи аппаратно-программного комплекса акустико-эмиссионным методом. Представлены результаты исследования в виде рисунков, проецируемых аппаратно-программным комплексом.

Результаты исследования. Описано применение акустико-эмиссионного метода контроля композиционного материала.

Обсуждение и заключение. Полученные в результате проведенного эксперимента результаты могут быть использованы в процессе определения пределов прочности различных композиционных материалов акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля для проведения оценки технического состояния в машиностроении, судостроении и авиастроении. Статья рекомендована научным сотрудникам, занимающимся проектированием летательных аппаратов и беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: композиционный материал, стеклопластик, боропластик, углепластик, органоластик, летательный аппарат, беспилотный летательный аппарат, неразрушающий контроль, акустико-эмиссионный контроль, рентгеновский контроль, тепловой контроль.

Для цитирования: Попов, А. В. Применение и оценка технического состояния композиционных материалов в летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля / А. В. Попов, А. О. Самуйлов, И. С. Черепанов // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 328–336. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336>

© Попов А. В., Самуйлов А. О., Черепанов И. С., 2021



Application and evaluation of the technical condition of composite materials in aircraft and unmanned aerial vehicles by acoustic emission method of nondestructive testing

A. V. Popov , A. O. Samuylov , I. S. Cherepanov 

Military Educational and Scientific Center of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh, Russian Federation)

Introduction. The paper analyzes the application of composite materials as the main determining method of reducing the mass of the airframe and an unmanned aerial vehicle. Advanced nondestructive testing methods provide assessing the technical condition of these materials, as well as determining stress concentrators on the airframe and an unmanned aerial vehicle with high accuracy in order to make a decision on the further operation of this object under control. The objective of the work was to increase the accuracy and efficiency of the assessment of crack resistance of composite materials through the acoustic emission control.

Materials and Methods. This paper presents the nomenclature of composite materials used in the construction of various aircraft, including unmanned aerial vehicles. The most possible probable defects of these materials due to the influence of operational factors are presented. The applied methods of nondestructive testing of composite material and selection of the most suitable one according to specific advantages were compared. An experiment was carried out to determine the strength limits of carbon fiber using a hardware and software complex by acoustic emission method. The research results are presented in the form of drawings projected by the hardware and software complex.

Results. The application of the acoustic-emission method of composite material control is described.

Discussion and Conclusions. The results obtained experimentally can be used in the process of determining the strength limits of various composite materials by the acoustic emission method of nondestructive testing to assess the technical condition in mechanical engineering, shipbuilding, and aircraft construction. The paper is recommended to researchers involved in the design of aircraft and unmanned aerial vehicles.

Keywords: composite material, fiberglass, boron-fiber reinforced plastic, carbon fiber, organoplastics, aircraft, unmanned aerial vehicle, non-destructive testing, acoustic emission control, X-ray control, thermal control.

For citation: A. V. Popov, A. O. Samuylov, I. S. Cherepanov. Application and evaluation of the technical condition of composite materials in aircraft and unmanned aerial vehicles by acoustic emission method of nondestructive testing. *Advanced Engineering Research*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 328–336. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336>

Введение. Развитие современной авиационной техники (АТ) сопровождается созданием новых конструкционных композитных материалов (КМ) с перспективными механическими и физическими свойствами. Уменьшение взлетного веса конструкции является неотъемлемой задачей для авиационной промышленности. Конструкция планера большей части современных воздушных судов (ВС) выполнена на 53 % из КМ, а беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — на 90 %. Исходя из этого, есть необходимость в оценке технического состояния КМ планера радиационными, тепловыми, акустико-эмиссионными (АЭ) методами неразрушающего контроля (НК). Специфической особенностью метода акустической эмиссии является возможность оценки развития различных дефектов.

Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного контроля.

Композиционный материал — искусственно созданный человеком материал, получаемый соединением в одну структуру разнородных составляющих и характеризующийся лучшими свойствами, по сравнению со свойствами каждого из компонентов.

КМ имеет следующие отличительные признаки:

- запроектированные состав и форма;
- невозможность встречи аналога в природе;
- состав определяется набором n компонентов;
- свойства КМ определяются свойствами компонентов;
- «служебные свойства» — отсутствие таких свойств у компонентов по отдельности;
- неоднородность в микромасштабе;
- неоднородность в макромасштабе.

Основные преимущества и недостатки КМ приведены в таблице 1:

Таблица 1

Основные преимущества и недостатки КМ

№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	Низкая плотность ($\rho = 1,35\text{--}4,8 \text{ г/см}^3$)	Сложная технология получения
2	Высокая прочность ($\sigma_{\text{в}} = 1750 \text{ МПа}$)	Высокая стоимость КМ
3	Высокая жесткость ($E = 270\,000 \text{ МПа}$)	Невысокая прочность связи волокон с матрицей
4	Жаропрочность	Низкое сопротивление эрозии и деструкция
5	Термическая стабильность	

Основные материалы, применяемые в авиастроении, приведены на рис. 1 [1].

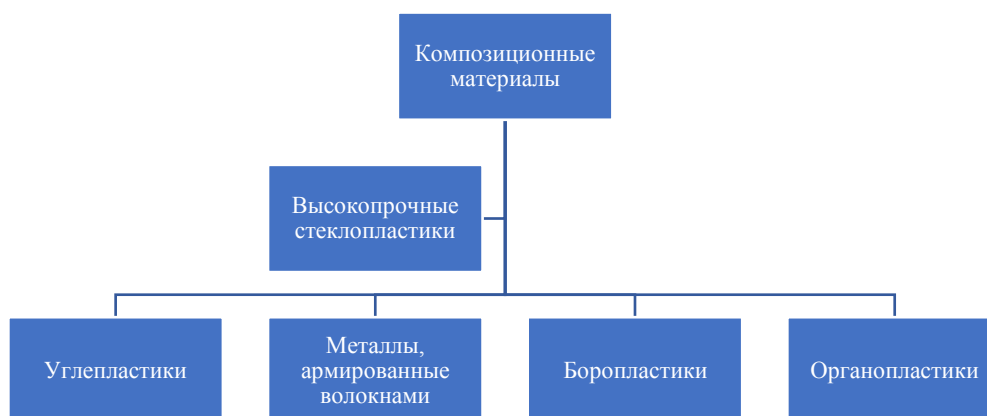


Рис. 1. Классификация КМ

Материалы и методы

Высокопрочные стеклопластики

Стеклопластики — КМ, состоящие из полимерной матрицы и стекловолоконного наполнителя, в котором присутствуют газообразные включения. Объем использования стеклопластиков различного назначения увеличивается. Это обосновано невысокой стоимостью и доступностью сырья, малой энергоемкостью производства стеклянного волокна, универсальностью и возможностью регулирования в широких пределах физико-механических свойств, возможностью создания гибридных материалов и конструкций на их основе. Изделия из стеклопластиков поддаются всем видам механической обработки. К основным примерам стеклопластиков, применяемым при создании ВС и БПЛА, относят: КАСТ-В листовой, ВФТ-С, СТ-911-1А, СК-9ФА, СТМ-Ф герметичный, ВПС-19М герметичный [2, 3].

Углепластики

Углепластики — КМ, состоящие из связующего и упрочнителей в виде углеродных волокон, нитей, жгутов, лент или тканей. Связующими выступают различные эпоксидные или фенолоформальдегидные смолы. Основные марки углепластиков: КМУ-1, КМУ-1У, КМУ-1В, КМУ-1Л, КМУ-2Л, КМУ-3Л, КМУ-3, КМУ-4Л, КМУ-4Э, КМУ-6-41.

Боропластики

Боропластики — КМ, состоящие из полимерного связующего и упрочнителя — борных волокон. В качестве матрицы используют эпоксидные и полиамидные связующие, а в роли упрочнителей — борные нити или комплексные боростеклонити. Применение боростеклонитей облегчает технологический процесс изготовления боропластиков. К ним относят: КМБ-1, КМБ-1М, КМБ-1К, КМБ-2К, КМБ-3К.

Органопластики

Органопластики — КМ, в которых в качестве армирующего наполнителя выступают волокнистые наполнители. Синтетические волокна обладают хорошими текстильными свойствами. Из них можно получить широкий спектр различных структур: нити, жгуты, ленты, комбинированные ткани. Синтетические волокна незначительно теряют прочность при текстильной переработке. Они малочувствительны к повреждениям. Примеры органопластиков: 7Т, 7Т0, 5Т, 9Т, 6ТКС, 6ТКБ, 7ТКС, 8ТКС.

Металлы, армированные волокнами

Металлы, армированные волокнами, — КМ, в которых в качестве упрочнителя выступают волокна бора, углеродные волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений. В качестве матрицы применяют различные металлы и сплавы, обладающие характерной пластичностью.

Примеры таких материалов: алюминий-борное волокно (ВКА-1А), алюминий-угольное волокно (ВКУ-1), магний-борное волокно (ВКМ-1), магний- угольное волокно, никель-фольфрамовая проволока (ВКН-1).

Объемы использованных КМ в конструкции планера перспективного ЛА различны и составляют: крыло — 80 %, оперение — 81 %, фюзеляж — 31 %, пилон — 34 %, шасси — 23 %. Органы управления самолета Ил-96-300, лопасти несущего винта вертолета Ми-28, планер самолета МС-21 частично выполнены из КМ.

Объем КМ планера БПЛА достигает 90 %. Яркими примерами являются «Крунк», «Дозор-600», «Иноходец».

Применение КМ в планере ВС и БПЛА может значительно облегчить вес конструкции. По формулам (1), (2) можно определить изменение массы планера при применении в нем КМ:

$$\Delta m_{пл} = m_{пл}^T - m_{пл}^K = (\sum_{i=1}^n m_{пл_i}^T + \Delta m) - (\sum_{i=1}^n m_{пл_i}^T - \sum_{i=1}^n \varphi_i (1 - \varepsilon_i)) m_{пл_i}^T + \Delta m \quad (1)$$

$$\Delta m_{пл} = \sum_{i=1}^n \varphi_i (1 - \varepsilon_i) m_{пл_i}^T \quad (2)$$

где $m_{пл}^T$ — масса i -й части планера из традиционных материалов; $m_{пл}^K$ — масса i -й части планера из композиционных материалов; m — масса традиционных материалов; φ_i — коэффициент, учитывающий отношение масс традиционных и композиционных материалов, значения которого лежат в диапазоне $0 \leq \varphi_i \leq 1$; ε_i — коэффициент массового достоинства КМ, равный отношению массы элементов i -й части планера из КМ к массе i -й части из традиционных материалов ($\varepsilon_i = \frac{m_{пл_i}^K}{m_{пл_i}^T}$).

Если $\Delta m_n > 0$, то $m_{пл}^K < m_{пл}^T$ — планер из КМ легче планера из традиционных материалов. Применяя формулы (1) и (2) можно добиться снижения массы конструкции планера ВС на 28 %, БПЛА — на 60 %.

Вследствие влияния эксплуатационных факторов (рис. 2) возможно возникновение дефектов в КМ, представленных в таблице 2 [1].

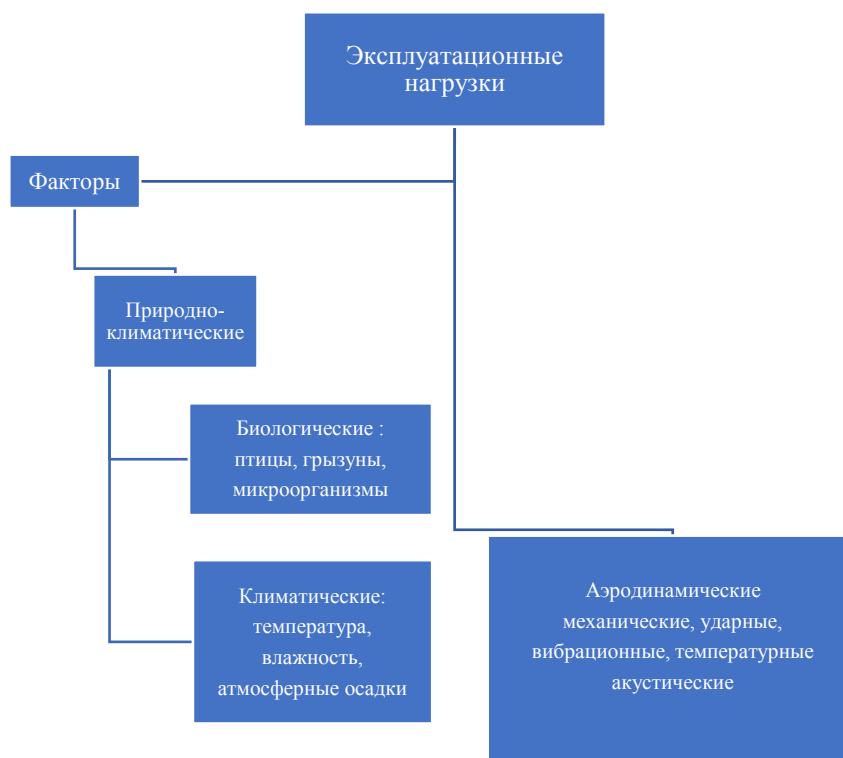
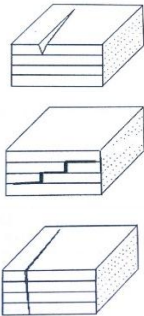
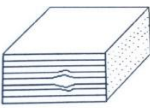
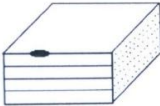


Рис. 2. Классификация эксплуатационных факторов влияния на структуру КМ [1]

Таблица 2

Классификация и характеристика дефектов КМ

Наименование дефекта	Изображение дефекта	Причины возникновения дефекта
Поверхностная трещина Внутренняя трещина Сквозная трещина		Высокая скорость охлаждения, превышение допустимых механических нагрузок, транспортировка
Раковина		Повышение содержания летучих в препреге, изменение скорости нагрева, увеличение времени и величины приложения давления
Поверхностное инородное включение		Попадание инородных материалов при изготовлении препрега при его расколе и выкладке

Данные дефекты можно диагностировать за счет применения методов неразрушающего контроля, позволяющих определить техническое состояние планера ВС или БПЛА без уменьшения их пригодности к применению.

К таким методам относят:

- рентгеновский метод;
- тепловой метод;
- ультразвуковой метод;
- метод акустической эмиссии (АЭ).

Рентгеновский метод

Рентгеновский метод основан на приеме и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Интенсивность излучения изменяется в зависимости от плотности материала, его толщины и наличия дефектов¹. Для регистрации прошедшего излучения применяются рентгеновские пленки выбранной вариационной чувствительности, флуоресцирующие экраны и телевизионные установки. Часть конструкции планера ЛА или БПЛА помещается в рентгеновскую установку «СаФайр» для осуществления контроля. Результат проведения рентгеновского излучения проецируется на пленке, в которой дефект будет изображен цветом бледнее, чем фон всей конструкции. Основным недостатком рентгеновского метода является вредное воздействие на объект и субъект контроля [4, 5].

Тепловой метод

Тепловой метод основан на приеме данных об изменении тепловых температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами. Данный метод осуществляется посредством применения тепловизоров и авиационных фенов.

Первоначально происходит нагрев 1/3 части конструкции планера БПЛА при помощи авиационного фена. На межмолекулярном уровне происходит передача энергии от более нагретой части планера к более холодной. Наблюдаем процесс перетекания энергии используя тепловизор. Окраска дефекта отличается от описываемого выше процесса (рис. 3) [6–8].

¹Феррозондовый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. Руководящий документ РД 32.149. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2008. 163 с.

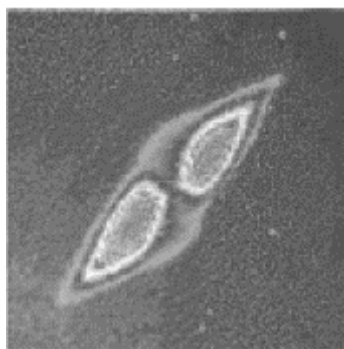


Рис. 3. Изображение дефекта планера БПЛА путем применения теплового метода

Недостаток данного метода — неспособность осуществления проведения контроля в необогреваемых помещениях.

Ультразвуковой метод

Ультразвуковой метод основан на регистрации упругих волн, создавшихся в контролируемой детали. Дефектоскопы УД2В-П, УДТ-40, УСД-50 позволяют обнаруживать трещины порядка 0,5–1 мм. Для осуществления контроля необходимо установление контактной среды между контролируемой частью планера ЛА или БПЛА и приемником-преобразователем дефектоскопа [9–11]. Основной недостаток — вредное воздействие на субъект контроля.

Метод акустической эмиссии (АЭ)

Метод АЭ основан на процессе излучения акустических волн в процессе перестройки структуры материала. Данный метод является пассивным, так как основан на регистрации низкочастотных импульсов дефектов деталей под нагружением. АЭ метод, в сравнении с традиционными методами НК, обнаруживает глубоко залегающие трещины в конструкции материала (таблица 3).

Таблица 3

Сравнение методов НК

Метод НК	Длина обнаруживаемой трещины, мм
Ультразвуковой	0,5–1
Рентгеновский	2–3
Акустической эмиссии	0,000001
Тепловой	0,01–0,001

Для диагностики был создан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса АЭ диагностики, который позволяет в реальном масштабе времени регистрировать развивающиеся дефекты КМ в низкочастотном диапазоне (рис. 4). Для повышения эффективности АЭ контроля специалистами Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), в число которых входил и автор данной статьи А. В. Попов, был разработан теоретико-вероятностный подход к оценке информативных параметров эмиссии. Установлено, что на ранних стадиях деформирования поток сигналов АЭ КМ от микродефектов, случайным образом распределённых по объёму ВС, имеет пуассоновский характер. С ростом нагрузки объединение микродефектов в трещину КМ нарушает пуассоновское распределение. Разработанный специалистами центра способ оценки процессов накопления повреждений КМ в ЛА и БПЛА основан на оценке изменения распределений числа актов АЭ на фиксированных интервалах времени в процессе деформирования КМ. Деформация КМ приводит к образованию макродефекта, характеристики потока импульсов становятся зависимыми. Объединение микродефектов ОК разрушает гипотезу пуассоновского распределения. Данное явление позволяет построить параметрические инварианты, справедливые для пуассоновского характера, и на этой основе оценить отклонение анализируемого процесса от пуассоновского (3):

$$I_1 = \frac{m[x^3]}{m^2[x^3]} - 3m^2[x] - m^4[x] = 1 \quad (3)$$

На основании уравнения (3) получим несколько выражений для определения степени отклонения потока импульсов АЭ от пуассоновского (4)–(7):

$$I_2 = m[x^3] * m^2[x] - 3m^4[x] - m^6[x] - m^2[x] = 1 \quad (4)$$

$$I_3 = m[x^3] - 3m^2[x] - m^4[x] - 1 = 0 \quad (5)$$

$$I_4 = m[x^3] * m^2[x](3 - m^2[x]) = 1 \quad (6)$$

$$I_5 = \frac{m[x^5]-1}{m^2[x]} + m^2[x] = 3 \quad (7)$$

Построение инвариантных зависимостей на основании формул (3)–(7) производит экспериментально разработанный АПК (рис. 4), позволяющий осуществить многоканальную регистрацию, обработку и анализ значений нагрузок и деформаций; осуществлять видеонаблюдение и запись процесса испытаний и показаний аналоговых приборов при помощи видеокамер.

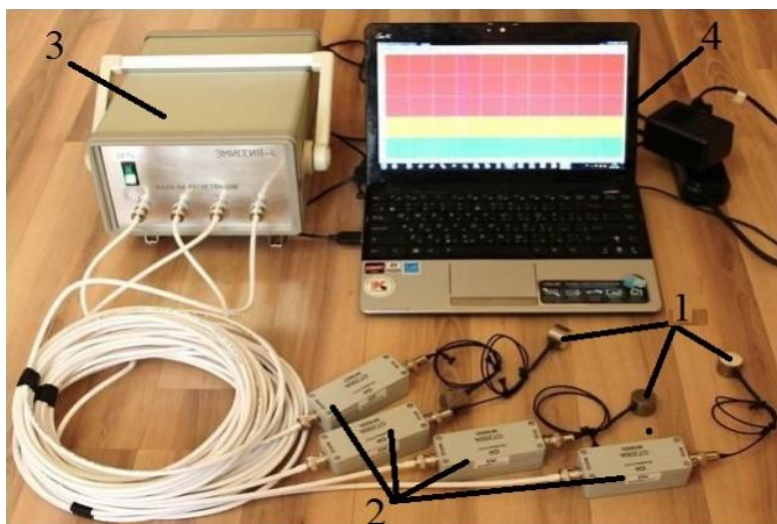


Рис. 4. Аппаратно-программный комплекс акустико-эмиссионной диагностики: 1 — высокочувствительный пьезоэлектрический датчик GT-300; 2 — предусилители виброакустического сигнала; 3 — аналого-цифровой преобразователь; 4 — ПЭВМ для обработки данных

Высокочувствительные пьезоэлектрические датчики GT-300 устанавливаются на контролируемую поверхность КМ. Информативные параметры о состоянии КМ с пьезоэлектрических датчиков поступают на предусилители виброакустического сигнала². После усиления сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, в котором происходит его преобразование из механической работы в электрическую. ПЭВМ служит для кластеризации и обработки принятых данных.

Результаты исследования. При помощи АПК и разрывной машины РМ-1 на базе ВУНЦ ВВС «ВВА» производили контроль углепластика КМУ-1, применяемого в производстве самолета ИЛ-96-300 и БПЛА «Орион». Основные характеристики КМУ-1 представлены в таблице 4:

Таблица 4

Характеристика углепластика КМУ-1

№ п/п	Пределы композита
1	Предел растяжения $\sigma_{\text{раст}} = 1020$ МПа
2	Предел сжатия $\sigma_{\text{сжат}} = 400$ МПа
3	Предел изгиба $\sigma_{\text{изг}} = 1100$ МПа
4	Предел сдвига $\sigma_{\text{сдвиг}} = 30$ МПа
5	Модуль Юнга растяжения $E_{\text{раст}} = 180 \times 10^{-3}$ МПа
6	Модуль Юнга изгиба $E_{\text{изг}} = 145 \times 10^{-3}$ МПа
7	Модуль Юнга сдвига $E_{\text{сдвиг}} = 3,5 \times 10^{-3}$ МПа

Для проведения испытаний поместили КМУ-1 в разрывную машину, предварительно установив на КМ датчики АЭ GT-300. Производили нагружение КМУ-1 при помощи АПК. Результаты нагружения представлены на рис. 5 (а, б, в):

² Попов А. В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионной контроле пат. 223444 Российская Федерация. G01N 29/00. заявл. 15.01.2003; опубли. 27.07.2004. Бюл. №21. 7 с.

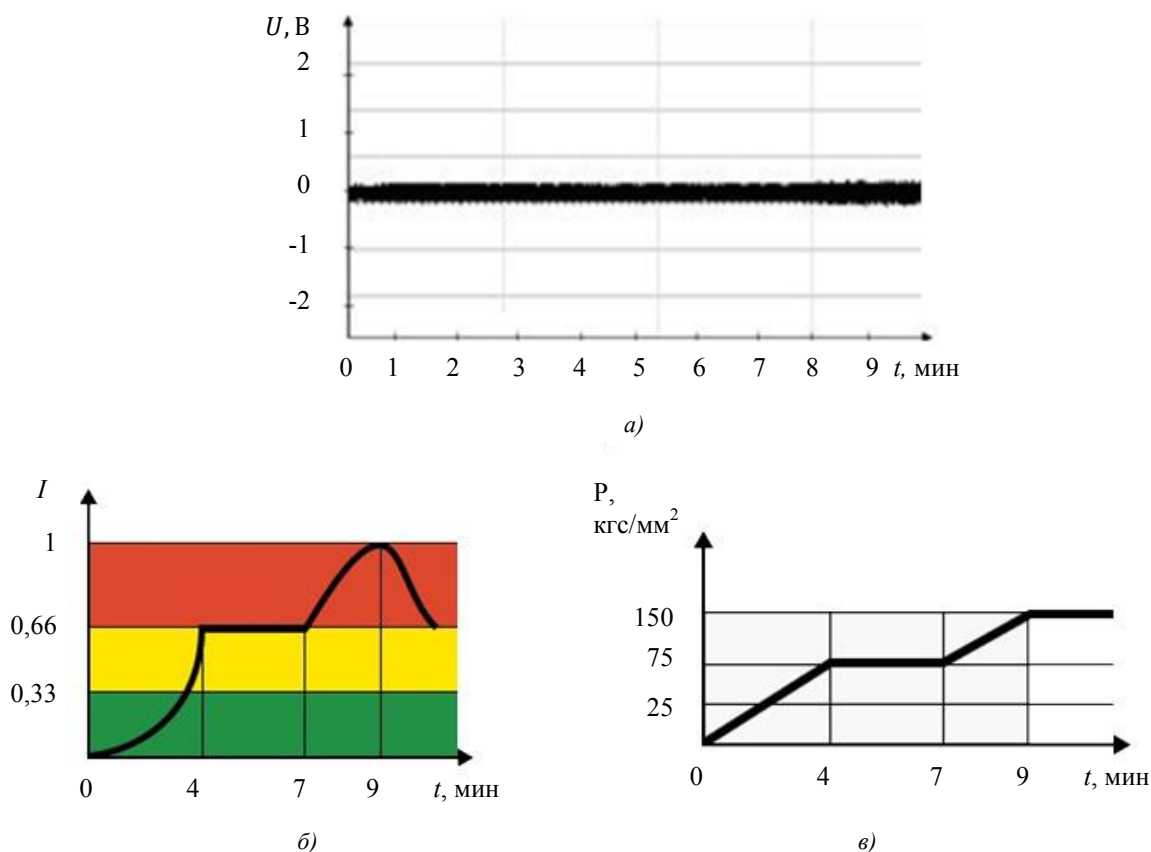


Рис. 5. Результаты нагружения КМК-1: а) осциллограмма сигналов АЭ КМУ-1; б) режим работы АПК; в) проекция динамики нагружения РМ-1 КМ КМУ-1

На рис. 5 а изображена осциллограмма сигналов АЭ КМУ-1. Максимальное значение амплитуды АЭ ОК соответствует разрушению матрицы и волокон ОК ($U_{max} = 0,25$ В).

На рис. 5 б представлен режим работы АПК. Здесь выделены три зоны — красная, желтая, зеленая. Красная зона характеризуется наличием ярко выраженных дефектов КМУ-1. Численное значение инварианта в пределах от 0,66 до 1 при $t = 7-9$ мин. Это свидетельство критически активного дефекта — стадия разрушения. Желтая зона — зона активного дефекта и стадии образования трещины ($I=0,33-0,66$; $t = 4-7$ мин). Зеленая — доброкачественная зона, характеризующая стадию микротрещин ($I=0-0,33$; $t = 9-4$ мин) [12, 13].

На рис. 5 в представлена проекция динамики нагружения РМ-1 КМ КМУ-1. Вследствие увеличения нагрузки ($P = 25,75,150$ кгс/мм²) растет значение инварианта и амплитуды АЭ КМУ-1.

Обсуждение и заключения. Применение КМ является перспективным методом оценки технического состояния при проектировании различных ВС и БПЛА. Одно из основополагающих преимуществ КМ — облегчение массы конструкции по сравнению с традиционными материалами. Контроль и оценку технического состояния ВС и БПЛА необходимо производить перспективными методами НК, способными выявить различного рода дефекты на ранней стадии их развития. Этим требованиям отвечает метод акустической эмиссии. В перспективе можно установить экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса на многофункциональный истребитель пятого поколения Су-57 для осуществления диагностирования конструкции летательного аппарата в полете. Данная акустико-эмиссионная система позволит идентифицировать дефекты, возникающие в элементах конструкции воздушного судна на малой стадии их развития. Экспериментально разработанный образец аппаратно-программного комплекса позволяет оперативно в реальном масштабе времени регистрировать развивающиеся дефекты авиационных материалов, применяемых в конструкции летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах.

Библиографический список

1. Волоконные композиционные материалы: пер. с англ. / Под ред. Дж. Уитона, Э. Скала. — Москва: Металлургия, 2011. — 240 с.
2. Григорович, В. К. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов / В. К. Григорович, Е. Н. Шефтель. — Москва: Наука, 1980. — 303 с.

3. Ермоленко, И. Н. Волокнистые высокотемпературные керамические материалы / И. Н. Ермоленко, Т. М. Ульянова. — Минск: Наука и техника, 1991. — 125 с.
4. Степанова, Л. Н. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях композиционных элементов авиационных конструкций / Л. Н. Степанова, В. Н. Чаплыгин, Е. Ю. Лебедев // Контроль. Диагностика. — 2004. — № 12. — С. 53.
5. Буйло, С. И. Диагностика стадий разрушения материалов по восстановленным параметрам потока актов акустической эмиссии / С. И. Буйло // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 10. — С. 10–15.
6. Чуи, Ч. Введение в вейвлеты / Ч. Чуи. — Москва: Мир, 2001. — 412 с.
7. Muravin, B. Guide for Development of Acoustic Emission Applications for Examination of Metal Structure / Boris Muravin, Mark F. Carlo // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 142–148.
8. Blind deconvolution of acoustic emission signals for damage identification in composites / Gangtie Zheng, M.A. Backle, G. Kister, Gerard F. Fernando // AIAA Journal. — 2001. — Vol. 39. — P. 1198–1205. <https://doi.org/10.2514/2.1435>
9. Skalskyi, V. R. Some methodological aspects of application of acoustic emission / V. R. Skalskyi, P. M. Koval. — Lviv: Spolom; 2007. — 336 p.
10. Maochen Ge. Analysis of Source Location Algorithms, Part I: Overview and non-iterative methods / Maochen Ge // Journal of Acoustic Emission. — 2003. — Vol. 21. — P. 14–28.
11. Barat, V. Detection of AE signals against background friction noise / V. Barat, D. Grishin, M. Rostovtsev // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 133–141.
12. Попов, А. В. Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик АЭ процессов / А. В. Попов, Е. А. Кондрашин // Контроль. Диагностика. — 2008. — № 7. — С. 45–46.
13. Попов, А. В. Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов / А. В. Попов, В. Э. Жумай // Контроль. Диагностика. — 2008. — № 10. — С. 29–31.

Поступила в редакцию 28.09.2021

Поступила после рецензирования 18.10.2021

Принята к публикации 28.10.2021

Об авторах:

Попов Алексей Владимирович, профессор кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная 153), доктор технических наук, профессор, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-2007), irinacherepanova2007@mail.ru

Самуйлов Александр Олегович, адъюнкт кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная 153), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-2007), slavka2.0@mail.ru

Черепанов Иван Сергеевич, курсант факультета летательных аппаратов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-2007), veselova.27@icloud.com

Заявленный вклад соавторов:

Черепанов И. С. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Попов А. В., Самуйлов А. О. — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.22

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345>

Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах

А. Т. Рыбак¹  , А. В. Ивановская² , П. П. Батура¹ , А. Ю. Пелипенко¹ 

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», КГМТУ (г. Керчь, Республика Крым)

 2130373@mail.ru



Введение. Статья посвящена анализу конструктивных решений гидравлических делителей потока, используемых для синхронизации гидравлических приводов рабочих органов технологических и мобильных машин. Выявлены потребности рынка в многопоточных беззолотниковых дроссельных делителях потока с управляемым коэффициентом деления, таких как многоосные шасси транспортных средств.

Целями работы были анализ возможности и обоснование целесообразности разработки дроссельного четырехпоточного делителя потока беззолотникового типа с чувствительными элементами типа трубка Вентури. Решение должно обеспечить синхронность перемещения (вращения) более трех рабочих органов технологических и мобильных машин.

Материалы и методы. Исследованы патенты существующих конструкций гидравлических делителей потока. Рассмотрены системы, в которых требуется деление потока гидравлической жидкости более чем на два исполнительных органа. Для конструкции дроссельного трехканального делителя потока беззолотникового типа предложен вариант модернизации, который позволяет делить поток на четыре ветви.

Результаты исследования. Обоснована актуальность разработки многопоточного дроссельного делителя потока беззолотникового типа для применения в промышленных и мобильных машинах. Рассмотрены два типа четырехпоточных делителей, указаны их слабые стороны. Отмечено, что разработка многопоточного дроссельного делителя потока на основе конструкций, созданных в 1989 и 1991 годах, позволит сократить число гидронасосов, избавиться от последовательного соединения двухпоточных делителей. Таким способом можно снизить потери давления в гидросистеме и реализовать адаптивное управление гидродвигателями многодвигательных мобильных машин. Показана возможность на базе трехпоточного дроссельного делителя получить делитель-сумматор на четыре потока путем добавления выпускной камеры, связанной с камерой мембраны через канал, входящий в сопло трубки Вентури. Описан принцип работы такого оборудования.

Обсуждение и заключения. Рассмотрены принципы построения дроссельных делителей потока беззолотникового типа. Предложен вариант модернизации для увеличения количества каналов деления с трех до четырех. Однако для подтверждения работоспособности такой конструкции необходим численный анализ различных режимов работы делителя — расчет приведенной объемной жесткости его рабочих полостей. Полученная информация может быть использована для модернизации гидравлических узлов технологических и мобильных машин, повышения их надежности, технологичности и коэффициента полезного действия. Определены вопросы, которые необходимо решить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: дроссельный делитель потока, трубка Вентури, гидравлическая трансмиссия, многоосное шасси, транспортная платформа, синхронизация.

Для цитирования: Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах / А. Т. Рыбак, А. В. Ивановская, П. П. Батура, А. Ю. Пелипенко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 337–345. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345>

© Рыбак А. Т., Ивановская А. В., Батура П. П., Пелипенко А. Ю., 2021



Synchronization in multi-motor hydromechanical systems

A. T. Rybak¹ , A. V. Ivanovskaya² , P. P. Batura¹ , A. Yu. Pelipenko¹ 

¹ Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

² Kerch State Maritime Technological University (KGMTU) (Kerch, Russian Federation)

✉ 2130373@mail.ru

Introduction. The paper submits the analysis of existing design solutions of flow dividers used to synchronize hydraulic drives of working bodies of technological and mobile machines. The market demands for multithreaded throttle flow dividers without valves with the controlled division ratio, such as multi-axle vehicle chassis, are identified. The objective of the work was to analyze the possibility and rationale for developing a throttle four-way flow divider without valves with sensing elements of the Venturi tube type. The solution should provide the synchronicity of movement (rotation) of more than three working bodies of technological and mobile machines.

Materials and Methods. A patent search for the designs of hydraulic flow dividers is carried out, and systems that require the division of the hydraulic fluid flow into more than two executive bodies are considered. An upgrade option, which allows dividing the flow into four branches, is proposed for the design of a three-channel throttle flow divider without valves.

Results. The urgency of developing a multithreaded throttle flow divider without valves for application in industrial and mobile machines is validated. Two types of four-flow dividers are considered, their weaknesses are indicated. It is noted that the development of a multithreaded throttle flow divider based on the designs created in 1989 and 1991 will reduce the number of hydraulic pumps and get rid of the series connection of double-flow dividers. In this way, it is possible to reduce pressure losses in the hydraulic system and implement adaptive control of hydraulic motors of multi-motor mobile machines. The possibility to obtain a divider/combiner into four flows by adding an outlet chamber connected to the membrane chamber through a channel entering the Venturi nozzle on the basis of a three-flow throttle divider is shown. The principle of operation of such equipment is described.

Discussion and Conclusions. The principles of construction of throttle flow dividers without valves are considered. An upgrade option is proposed to increase the number of division channels from three to four. However, to validate the operability of this design, a numerical analysis of the various modes of operation of the divider is required — calculation of the reduced volumetric stiffness of its working cavities. The information obtained can be used to modernize the hydraulic units of technological and mobile machines, increase their reliability, manufacturability, and efficiency. The issues that need to be solved in further research are identified.

Keywords: throttle flow divider, Venturi tube, hydraulic transmission, multi-axle chassis, transport platform, synchronization.

For citation: A. T. Rybak, A. V. Ivanovskaya, P. P. Batura, A. Yu. Pelipenko. Synchronization in multi-motor hydromechanical systems. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 337–345. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345>

Введение. Условие абсолютной синхронизации — соблюдение пропорциональности линейных и угловых перемещений гидродвигателей и всех производных от них по времени. Часто бывает необходимо синхронизировать:

- однородные линейные или вращательные движения двух и более гидроприводов,
- один двигатель с поворотом второго.

В станкостроении и машиностроении при синхронизации приводов важно учитывать ошибки синхронизации по положению. В статье рассмотрены способы синхронизации гидродвигателей в многодвигательных системах с делителем потока, а также примеры применения таких систем в промышленности. Помимо этого обсуждается применение многопоточного дроссельного делителя потока беззолотникового типа в качестве синхронизирующего устройства многоосной колесной сцепки гидравлической транспортной платформы.

Фундаментальные труды о гидромеханических системах известны с древности. Самый ранний из сохранившихся — трактат Архимеда «О плавании тел». Сегодня применение сложных многоуровневых и разветвленных гидросистем достаточно исследовано, однако остается актуальным вопрос управления и регулирования в гидроприводе^{1,2} [1–4] для повышения его КПД и уменьшения габаритов системы.

¹ Урекин В. С., Истомина Ю. В. Разработка гидравлических систем автоматического управления приводами технологического оборудования // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. II Всерос. науч.-тех. конф. Пенза : Межотраслевой науч.-инф. центр, 2016. С. 259–262.

² Лазута И. В., Лазута Е. Ф. Нелинейная корреляция релейной автоматической системы управления гидравлическим приводом // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. науч. тр. нац. науч.-практ. конф. Омск : СибАДИ, 2018. С. 64–69.

В разряд сложных гидросистем входят такие, где один гидронасос питает два или более независимых гидродвигателя. При этом независимо от нагрузки на выходные звенья должна обеспечиваться синхронность их движений. Требуемая точность синхронизации определяет выбор ее способа. Простейший из них — обеспечение жесткой механической связи гидродвигателей. Однако для систем со сложным расположением исполнительных органов в пространстве он не применим. Наиболее распространенные методы:

- с помощью связанных валом гидромоторов или гидронасосов (объемная синхронизация);
- с последовательным соединением полостей гидродвигателей;
- с гидравлическими следящими системами с распределителями и гидротахометрами,
- с гидромеханическими и электрогидравлическими следящими системами.

Наиболее целесообразные и простые средства синхронизации в мобильных машинах и технологическом оборудовании — это дроссельные делители и сумматоры потоков^{3,4} [5–8]. Гидравлический делитель потока разделяет один поток рабочей жидкости на два или более. При этом учитывается заданное соотношение и требуется обеспечить синхронное (согласованное) движение выходных звеньев независимо от их нагрузки. Сумматор потока действует аналогично делителю, но в обратном направлении. Он легко интегрируется в гидравлическую систему, дешев и удобен в эксплуатации. Сумматоры потока обеспечивают синхронизацию в широком диапазоне скоростей движения выходных звеньев гидродвигателей.

В классической конструкции дроссельного делителя в качестве запорно-регулирующего элемента используются золотниковые пары [5]. Это обуславливает характерные недостатки таких делителей. Например, высокая себестоимость прецизионных золотниковых пар объясняется сложностью изготовления, большой долей таких высокоточных операций, как хонингование, шлифование, электроэрозионная обработка. Селективная сборка и доводка золотниковых пар делает их практически неремонтопригодными, что тоже повышает их эксплуатационную стоимость. Вышеизложенное также указывает на восприимчивость системы к качеству гидравлической жидкости, к которой предъявляют весьма высокие требования [6].

Известны попытки конструировать делители без золотниковых пар^{5,6,7,8}. Исследовались возможности улучшения характеристик золотниковых делителей. Следует отметить, что перечисленные конструкции делителей потока обеспечивают синхронизацию только двух исполнительных механизмов, и это значительно сужает сферу их применения. Цель настоящего исследования — поиск перспективной конструкции многопоточного дроссельного делителя, отвечающего требованиям эксплуатации мобильных машин.

Материалы и методы

Многодвигательные гидромеханические системы. Известны гидросистемы, в состав которых входит более двух рабочих органов (как реверсируемых, так и не реверсируемых). В зависимости от условий эксплуатации они требуют постоянной или кратковременной синхронности движения с постоянным или изменяемым соотношением скоростей. К таким системам, в частности, можно отнести:

- ходовые гидроприводы мобильных машин,
- вытягивающие прессы для крупного листового проката,
- штамповочные станки для габаритных деталей,
- группы гидродомкратов для подъема фундаментов зданий,
- гидроприводы складывания рулевого оперения в аэрокосмической технике,
- системы позиционирования лепестков рефлекторного зеркала радиотелескопа.

Применение в таких системах известных дроссельных делителей потока беззолотникового типа, несомненно, улучшает эксплуатационные характеристики. В то же время число синхронизируемых рабочих органов ограничено двумя на один делитель потока. Данное ограничение вынуждает конструкторов использовать последовательное каскадирование делителей потока. Вследствие этого на выходе из каскадов деления растут потери давления (до 30 %) и суммируется ошибка синхронизации каждого делителя. Немаловажно и увеличение объема, занимаемого гидроаппаратурой. В целом, такой подход технически не оправдан и затратен в финансовом отношении.

³ Яцухин Ю. А. Исследование гидравлической системы синхронизации движения рабочих органов сельскохозяйственных машин : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 1972. 25 с.

⁴ Рыбак А. Т. Изыскание рационального типа запорно-регулирующего элемента дроссельного делителя потоков гидроприводов синхронных механизмов сельскохозяйственных машин : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 1989. 23 с.

⁵ Делитель потока : патент 1041773 СССР : F 15 B 11/22 / Р. П. Кириков, Э. Б. Шерман, В. Л. Кузик [и др.]. № 3336116/25–06 ; заявл. 03.09.1981 ; опубл. 15.09.1983, Бюл. № 34. 3 с.

⁶ Делитель расхода : патент 1566897 Франция / № 150410 ; заявл. 03.05.1968 ; опубл. 1970.

⁷ Дроссельный делитель потока : а. с. 1151725 СССР : F 15 B 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. Н. Негодов [и др.]. № 3583155/25–06 ; заявл. 26.04.1983 ; опубл. 23.04.1985, Бюл. № 15. 3 с.

⁸ Flow divider : патент 10578221 США / № 15/730,196 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 03.05.2020.

В этой связи стоит отметить конструкцию дроссельного делителя потока мембранного типа⁹. Его можно использовать в реверсивных гидросистемах, в которых нужно динамично менять соотношение скоростей исполнительных органов. Кроме того, данная конструкция позволяет создать на ее основе делитель на 3, 4 и более независимых потоков¹⁰.

Рассмотрим применение дроссельного делителя потока беззолотникового типа на примере гидрообъемной трансмиссии колесного привода многоосных транспортных шасси.

Для конструирования трансмиссионных систем современных полноприводных автомобилей, как правило, применяются блокированная и дифференциальная схема. Блокированная трансмиссия обеспечивает жесткую связь ведущих колес. Дифференциальная характеризуется разветвлением одного входящего потока мощности между ведущими мостами и колесами через специальный дифференциальный узел. Существуют и комбинированные трансмиссионные схемы, в которых одна часть колес объединена дифференциальной связью, а другая — блокированной (например, блокировка нескольких дифференциалов). Для трансмиссионных систем невозможна принудительная регулировка:

- подводимой мощности к одному или нескольким колесам,
- одного моста независимо от других.

Наличие в трансмиссионной системе шасси гидропривода позволяет индивидуально подводить мощности к колесам и обеспечивает бесступенчатое регулирование в широком диапазоне значений. Конструкция гидропривода компактна, устойчива к внешним атмосферным воздействиям. К тому же у гидропривода, как правило, большой диапазон регулирования, что важно для автомобиля высокой проходимости. Еще одно преимущество гидрообъемного привода колес — возможность быстрого реверсирования. Это важно при прохождении препятствий путем раскачивания. Гидрообъемный привод колес обеспечивает длительное движение на минимальной скорости с высоким тяговым усилием, что также повышает проходимость автомобиля.

Гидравлическая схема ходовой части для одной оси такой машины в общем виде представлена на рис. 1.

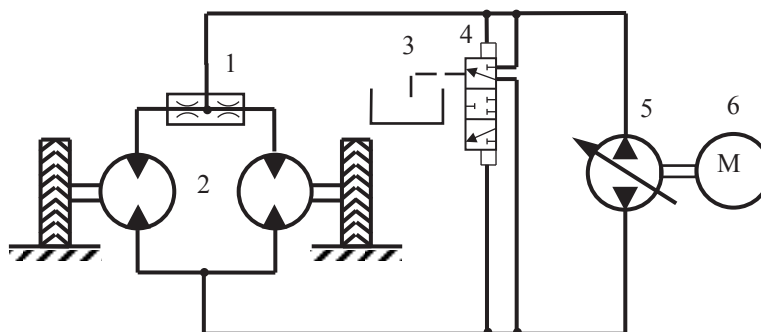


Рис. 1. Гидравлическая схема одной колесной оси мобильной транспортной машины

Рассмотрим систему гидрообъемной трансмиссии. Двигатель внутреннего сгорания 6 передает крутящий момент на реверсивный гидронасос 5, который соединен трубопроводами и гидрораспределителем 4 с делителем потока 1 и гидромоторами 2. Валы гидромоторов связаны с ведущими колесами. Зачастую аксиально-поршневые или радиально-поршневые гидродвигатели конструктивно соединены с колесом. Такая компоновка образует единый узел «гидромотор — колесо». Во время работы двигателя гидронасос обеспечивает гидромоторы ведущих колес гидродинамическим напором жидкости, который в дальнейшем преобразуется в механическую работу. В зависимости от конструктивного исполнения гидроагрегатов рабочее давление в системе находится в диапазоне 25–50 МПа. Эксплуатация узла «гидромотор — колесо» повышает проходимость шасси в результате непрерывного потока мощности и плавного изменения крутящего момента.

Компании Scheuerle и Kamag (Германия) выпускают модульные гидравлические транспортные платформы: средние — FlatCombi K22 и тяжелые самоходные — InterCombi K25 (рис. 2).

Модули средних серий шириной 2750 и 3000 мм рассчитаны на нагрузку 23 и 25 т на одну ось при скорости до 10 км/ч. Модули тяжелых серий оснащают 2–6-колесными осями. Ширина платформы — 3000 и 3100 мм, нагрузка на одну ось — 36–45 т. Самоходные модули приводятся в движение силовыми установками PowerBooster. Варианты их объединения:

⁹ Дроссельный делитель потока : патент 1670191 СССР : F 15 В 11/22 / Ю. А. Яцухин, Л. П. Колосов, А. Т. Рыбак [и др.]. № 3841241/29 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 15.08.1991, Бюл. № 30. 3 с.

¹⁰ Многопоточный делитель-сумматор потоков : патент 1742530 СССР : F 15 В 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. И. Антоненко. № 4694140/29 ; заявл. 23.05.1989 ; опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23. 2 с.

- одна платформа, на которую укладывают мостовое строение,
- две тележки с опорно-поворотными столами.



Рис. 2. Два соединенных 6-осных самоходных модуля InterCombi K25 компании Kamag (Германия)

В отечественном машиностроении можно выделить перспективную конструкцию многоосного, полностью гидравлического шасси, разработанную Центральным научно-исследовательским автомобильным и автомоторным институтом «НАМИ». Это трехосный автомобиль «Гидроход-49061»¹¹ (рис. 3).



Рис. 3. Автомобиль НАМИ «Гидроход-49061»

В конструкции этой машины реализована идея «гибкого колесного привода», которая предусматривает индивидуальный гидронасос для каждой из трех колесных осей. Транспортёр построен на базе шасси «ЗИЛ-4906». Оснащение шасси гидрообъемной трансмиссией позволяет реализовать все возможные типы колесных трансмиссий: блокированный, дифференциальный, с индивидуальным регулированием — и их комбинации. Промышленность заинтересована в развитии производства объемно-гидравлических колесных шасси высокой проходимости, что стимулирует новые исследования в этой области.

Делители потока широко применяются в схемах гидравлических трансмиссий для обеспечения блокирования дифференциала, что позволяет увеличить проходимость препятствий. Делитель потока гарантирует, что оба синхронизируемых колеса всегда будут создавать тяговое усилие, даже если одно из них находится на мягком или скользком грунте. Но для синхронизации и управления потоком в 4- и 6-осной конструкции необходимо последовательно соединить несколько делителей, причем с изменяемым соотношением деления по управляющему сигналу.

Результаты исследования. Рассматриваемые четырехпоточные делители можно отнести к одному из двух типов. В первом случае речь идет о конструкциях с золотником. Это каскад из трех делителей потока в

¹¹ Прочко Е. И. Методы построения систем силовых гидрообъемных приводов колес полноприводных автомобилей : автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2007. 20 с.

одном корпусе. В качестве примера можно привести делитель потока Poclairn FD-M4 (Франция)¹². На рис. 4 изображены его внешний вид и гидравлическая схема.

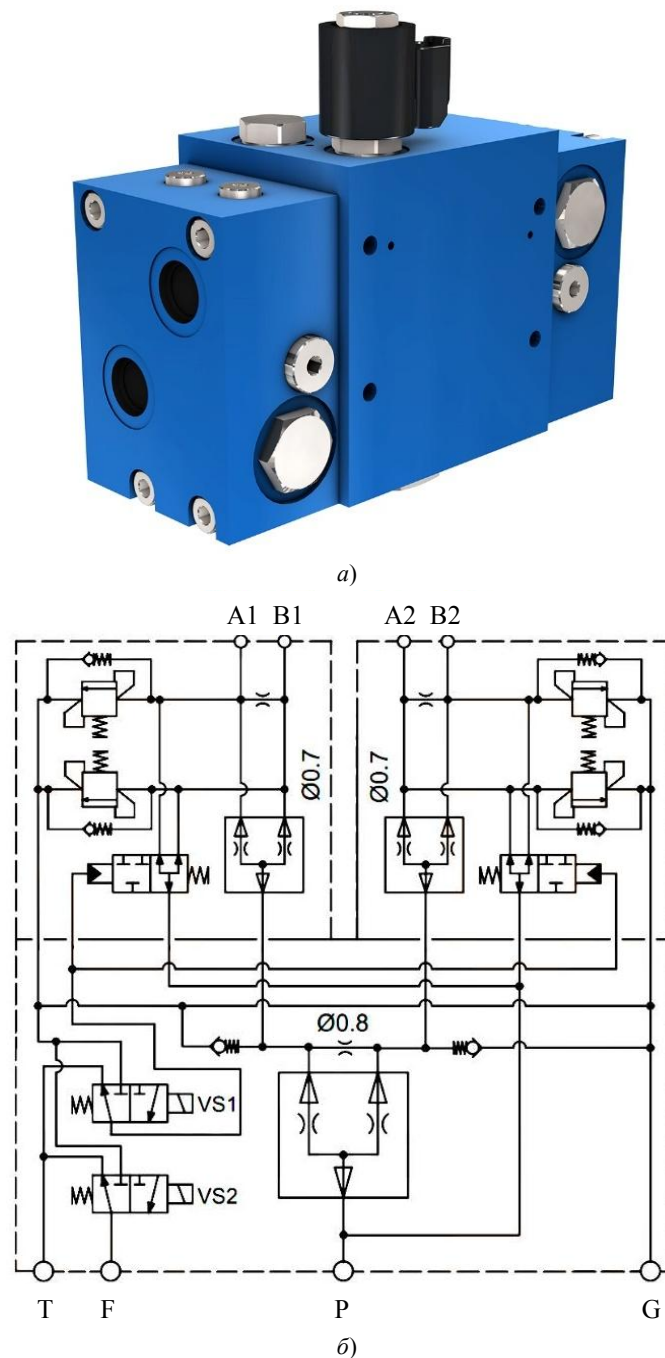


Рис. 4. Четырехпоточный делитель потока Poclairn FD-4M: внешний вид (а), принципиальная гидравлическая схема (б)

В конструкциях второго типа не предусмотрена возможность менять соотношение деления по внешнему управляющему сигналу. Это ограничивает сферу применения делителей в управляемых многодвигательных гидросистемах. Разработка многопоточного дроссельного делителя потока на основе конструкций, созданных в 1989 и 1991 годах^{13, 14}, позволит сократить число гидронасосов, избавиться от последовательного соединения двухпоточных делителей (соответственно, снизить потери давления в

¹² Каталог продукции компании Poclairn Hydraulics / POCLAIN Hydraulics // www.poclain-hydraulics.com [сайт]. URL: <https://www.poclain-hydraulics.com/upload/ressources/media/pdf/B33971Z.pdf> (дата обращения: 18.01.2021).

¹³ Дроссельный делитель потока : патент 1670191 СССР : F 15 В 11/22 / Ю. А. Яцухин, Л. П. Колосов, А. Т. Рыбак [и др.]. № 3841241/29 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 15.08.1991, Бюл. № 30. 3 с.

¹⁴ Многопоточный делитель-сумматор потоков : патент 1742530 СССР : F 15 В 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. И. Антоненко. № 4694140/29 ; заявл. 23.05.1989 ; опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23. 2 с.

гидросистеме), а также реализовать адаптивное управление гидродвигателями многодвигательных мобильных машин [7].

Так, например, можно получить делитель-сумматор на четыре потока (рис. 5) путем добавления выпускной камеры 16, связанной с камерой мембраны 10 через канал, входящий в сопло трубки Вентури 3. При этом левые камеры 15, 16 и правые камеры 17, 18 можно связать подвижным плунжером 13 между камерами 16 и 17.

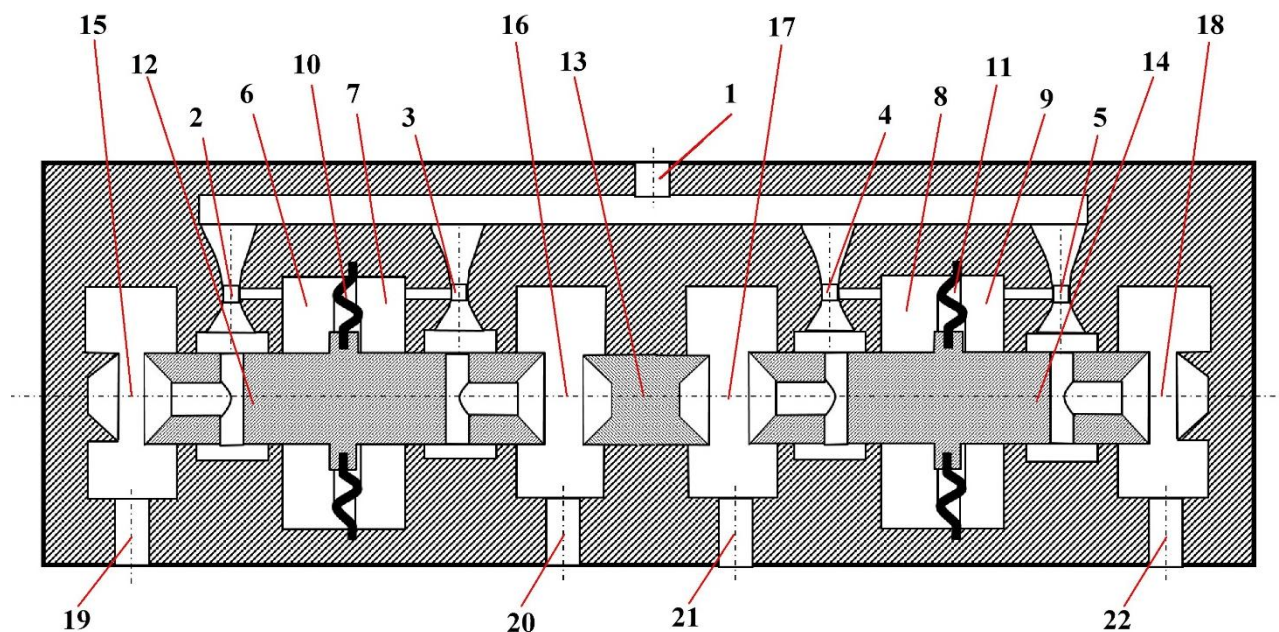


Рис. 5. Четырехпоточный делитель с чувствительными элементами типа трубка Вентури

Опишем принцип работы делителя-сумматора потоков с чувствительными элементами в виде трубок Вентури. Во время деления потока рабочая жидкость направляется на вход делителя-сумматора 1. Далее потоки разделяются между чувствительными элементами 2, 3, 4 и 5. Они выполнены в виде трубок Вентури, и их горловины соединены с прилегающими рабочими камерами 6, 7, 8 и 9. При этом камеры 6, 7 и 8, 9 — исполнительные элементы конструкции. Они отделены друг от друга мембранами 10 и 11 и жестко закреплены в теле подвижных плунжеров 12 и 14. Подвижный плунжер 13 обеспечивает связь между левой и правой частями делителя. После трубок Вентури потоки жидкости проходят через осевые и радиальные проточки плунжеров 12 и 13, а далее попадают на переменные сопротивления 15, 16 и 17, 18 и к выходным каналам 19, 20 и 21, 22.

Допустим, гидродвигатели на всех ветвях испытывают одинаковую нагрузку. Соответственно, в ветвях расходы одинаковы, а, значит, одинаковы и расходы через соответствующие им трубки Вентури. В горловинах трубок Вентури будут одинаковые скоростные напоры, поэтому давления в камерах управления будут также равны. С обеих сторон будет одинаковым давление на стенки мембранных элементов исполнительных механизмов, и это приведет их в уравновешенное состояние.

В случае возрастания нагрузки (например, на гидродвигателе присоединенном к выходному каналу 19) сократится расход в соответствующей ветви и соединенной с ней трубкой Вентури 2. Как следствие, уменьшится скоростной напор в ее горловине, а, значит, давление в ней увеличится. В свою очередь, это приведет к повышению давления в рабочей камере 6. В результате нарушится равновесие мембраны 10, и она будет сдвигаться вправо. Плунжер 12 также станет перемещаться вправо, сужая живое сечение переменных сопротивлений 16 и 17, которые через подвижный плунжер 13 связаны с сопротивлением 16. В результате в соответствующих ветвях и трубках Вентури 3 и 4 расход уменьшится. Плунжер 14 начнет перемещаться вправо и уменьшит живое сечение переменного сопротивления 18. Этот процесс будет продолжаться до уравнивания расходов во всех ветвях делителя.

В режиме суммирования потоки для объединения подводятся к выходным каналам делителя-сумматора, и его рабочий процесс идет в обратном порядке.

Стоит отметить, что еще на стадии разработки необходимо знать надежность и функциональные свойства предложенной конструкции делителя-сумматора. Лучшие способы получить необходимые данные — моделирование и численные эксперименты¹⁵ [9–13].

Обсуждение и заключения. Широкое применение многодвигательных разветвленных гидравлических систем в промышленной и мобильной технике часто предполагает синхронизацию их исполнительных механизмов. В зависимости от условий эксплуатации и требований к функциональности используются решения на основе сложных конструкций из регулируемых объемных гидромашин или дроссельных делителей потока [5–8]. В случаях, когда необходимо задействовать механизм согласования на короткое время, наиболее экономичным, на наш взгляд, способом синхронизации является использование дроссельного делителя потока. Рассмотренные гидромашин (рис. 2, 3) в полной мере соответствуют понятию многодвигательной гидросистемы. Применение дроссельных делителей потока в конструкции ведущих колесных осей таких машин обеспечит реализацию дифференциальной схемы без механической трансмиссии. Это повысит проходимость и позволит эффективно управлять гидроприводами колесной пары.

На рынке не представлены многопоточные дроссельные управляемые делители потока. Это указывает на востребованность их разработки.

Дальнейшая работа по проектированию четырехпоточного делителя-сумматора потока описанной в статье конструкции будет направлена на создание математической модели. Ее базой станут основы теории объемной жесткости^{16, 17, 18} [14–16]. Это позволит уточнить физические размеры элементов делителя-сумматора и рассчитать допустимые режимы работы.

Библиографический список

1. Симанин, Н. А. Адаптивное управление гидравлическим приводом металлорежущего станка / Н. А. Симанин, В. В. Коновалов, Ю. В. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2017. — Т. 23, № 2. — С. 338–347. [10.17277/vestnik.2017.02](https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.02)
2. Гидравлическая стабилизация нагруженных высокоскоростных пневматических приводов / В. А. Королев, И. Л. Коробова, С. М. Стажков, Б. Н. Воротынцев // Мехатроника, автоматика и робототехника. — 2019. — № 4. — С. 34–38. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2019-4-34-38>
3. Селиванов, А. М. Принцип комбинированного регулирования скорости выходного звена гидравлического привода и его современная реализация / А. М. Селиванов // Вестник Московского авиационного института. — 2011. — Т. 18, № 3. — С. 147–151.
4. Сунарчин, Р. А. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих приводах / Р. А. Сунарчин, М. А. Машков, А. В. Матросов // Динамика и виброакустика. — 2018. — Т. 4, № 3. — С. 16–25. <https://doi.org/10.18287/2409-4579-2018-4-3-16-25>
5. Скрицкий, В. Я. Синхронизация исполнительных органов гидрофицированных машин и механизмов / В. Я. Скрицкий, В. А. Рокшевский. — Москва : Машиностроение, 1973. — 140 с.
6. Рыбак, А. Т. Дроссельные делители и делители-сумматоры потоков синхронных гидросистем мобильных машин и технологического оборудования / А. Т. Рыбак // Вестник Донского государственного технического университета. — 2005. — Т. 5, № 2. — С. 179–188.
7. Рыбак, А. Т. Дроссельные делители и делители-сумматоры потоков для разветвленных гидравлических систем / А. Т. Рыбак // Вестник Донского государственного технического университета. — 2005. — Т. 5, № 1 (23). — С. 28–35.
8. О перспективных направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // Наука и техника. — 2012. — № 6. — С. 71–76.
9. Kobzev, K. Learning the basics of a battery pack control system / K. Kobzev, S. Vyalov, A. Rybak // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 164. — P. 13006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016413006>

¹⁵ Рыбак А. Т. Моделирование гидравлических систем на основе теории объемной жесткости / А. Т. Рыбак // Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. Дивноморское : ДГТУ-Принт. 2017. С. 234–242.

¹⁶ Мирный В. И. Повышение эффективности быстродействующего гидравлического привода возвратно-поступательного движения : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2008. 21 с.

¹⁷ Затолокин С. А. Совершенствование теории и методов проектирования гидромеханических систем с насосно-аккумуляторным источником расхода постоянного давления : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2009. 18 с.

¹⁸ Устьянцев М. В. Повышение эффективности привода стенда испытаний гидромашин вращательного действия : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2012. 18 с.

10. Khinikadze, T. Simulation of the hydraulic system of a device with self-adaptation by power and kinematic parameters on the working body / T. Khinikadze, V. Pershin, Y. Karagodskaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 1001. — P. 012061. [10.1088/1757-899X/1001/1/012061](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012061)
11. Ивановская, А. В. Обоснование применения гидравлического привода, чувствительного к изменению нагрузки / А. В. Ивановская, Е. В. Богатырева, В. В. Попов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2018. — № 1. — С. 62–68.
12. Pilipenko, S. S. Hydraulic transmission-multiplier drive with dosing modules / S. S. Pilipenko, M. R. Baiguzin, A. P. Potapenkov // Steel in Translation. — 2016. — Vol. 46. — P. 705–710.
13. Bidirectional synchronization control for an electrohydraulic servo loading system / Yong Sang, Weiqi Sun, Fuhai Duan, Jianlong Zhao // Mechatronics. — 2019. — Vol. 62. — P. 102254. [10.1016/j.mechatronics.2019.102254](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.102254)
14. Vanin, V. A. Stepper hydraulic motor with pneumatic (jet) control system in machines with hydromechanical forming links / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1278. — P. 012019. [10.1088/1742-6596/1278/1/012019](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012019)
15. Приведенная объемная жесткость гидравлических систем / В. П. Жаров, А. Т. Рыбак, С. А. Затолокин, В. И. Мирный // Вестник Донского государственного технического университета. — 2008. — Т. 8, № 4 (39). — С. 177–185.
16. Першин, В. А. Методика функциональной унификации адаптивного модуля гидропривода с функцией стабилизации нагрузки на рабочем органе мобильных машин / В. А. Першин, Т. А. Хиникадзе // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18, № 3. — С. 319–326. <https://doi.org/10.23947/19925980-2018-18-3-318-325>

Поступила в редакцию 04.10.2021

Поступила после рецензирования 25.10.2021

Принята к публикации 08.11.2021

Об авторах:

Рыбак Александр Тимофеевич, профессор кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), 2130373@mail.ru

Ивановская Александра Витальевна, доцент кафедры «Судовые энергетические установки» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат технических наук, доцент, [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), invkerch@yandex.ru

Батура Павел Петрович, аспирант кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), stalker-ghost77@mail.ru

Пелипенко Алексей Юрьевич, аспирант кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [Scopus](#), [ORCID](#), pelipenko16a@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Т. Рыбак — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. В. Ивановская — консультации по теме исследования. П. П. Батура — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение анализа литературы, подготовка текста, формулирование выводов. А. Ю. Пелипенко — доработка текста.

Все авторы ознакомлены и согласны с окончательным вариантом рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 910.31

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-346-363>

Применение инструментов машинного обучения и интеллектуальный анализ данных в отношении баз данных с небольшим количеством записей



Хуберт Аныш

Варшавский технологический университет (г. Варшава, Республика Польша)

h.anysz@il.pw.edu.pl

Использование инструментов интеллектуального анализа данных и машинного обучения становится все более распространенным явлением. Их полезность особенно заметна в случае больших наборов данных, когда информация, которую необходимо найти, или новые взаимосвязи извлекаются из информационного шума. Развитие этих инструментов означает, что исследуются наборы данных с гораздо меньшим количеством записей, обычно связанных с конкретными явлениями. Такая специфика чаще всего приводит к невозможности увеличения количества случаев, а это может облегчить поиск зависимостей в изучаемых явлениях. В статье рассмотрены особенности применения выбранных инструментов к небольшим наборам данных. Предприняты попытки представить методы подготовки данных, методы расчета производительности инструментов с учетом специфики баз данных с небольшим количеством записей. Предложены избранные автором методики, которые помогли выйти из тупика в расчетах, т. е. получить результаты, намного хуже ожидаемых. Необходимость применения методов повышения точности прогнозов и точности классификации была вызвана небольшим количеством анализируемых данных. Эта статья не является обзором популярных методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных, тем не менее собранный и представленный материал поможет читателю сократить путь к получению удовлетворительных результатов при применении описанных вычислительных методов.

Ключевые слова: машинное обучение, интеллектуальный анализ данных, искусственные нейронные сети, ассоциативный анализ, автоматическая классификация.

Для цитирования: Аныш, Хуберт. Применение инструментов машинного обучения и интеллектуальный анализ данных в отношении баз данных с небольшим количеством записей / Хуберт Аныш // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 346–363. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-346-363>

© Хуберт Аныш, 2021



Machine Learning and data mining tools applied for databases of low number of records

Hubert Anysz

Warsaw University of Technology (Warsaw, Poland)

h.anysz@il.pw.edu.pl

The use of data mining and machine learning tools is becoming increasingly common. Their usefulness is mainly noticeable in the case of large datasets, when information to be found or new relationships are extracted from information noise. The development of these tools means that datasets with much fewer records are being explored, usually associated with specific phenomena. This specificity most often causes the impossibility of increasing the number of cases, and that can facilitate the search for dependences in the phenomena under study. The paper discusses the features of applying the selected tools to a small set of data. Attempts have been made to present methods of data preparation, methods for calculating the performance of tools, taking into account the specifics of databases with a

small number of records. The techniques selected by the author are proposed, which helped to break the deadlock in calculations, i.e., to get results much worse than expected. The need to apply methods to improve the accuracy of forecasts and the accuracy of classification was caused by a small amount of analysed data. This paper is not a review of popular methods of machine learning and data mining; nevertheless, the collected and presented material will help the reader to shorten the path to obtaining satisfactory results when using the described computational methods.

Keywords: machine learning, data exploration, artificial neural networks, association analysis, automatic classification

For citation: Hubert Anysz. Machine Learning and data mining tools applied for databases of low number of records. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 346–363. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-346-363>

Введение. В эпоху всеобщего доступа в Интернет все больше и больше устройств взаимодействуют друг с другом или с централизованными базами данных. Рекламодатели превосходят друг друга в эффективности персонализированной рекламы. Все это заставляет бурно развиваться группу инструментов, известную как искусственный интеллект. Объем данных, который необходимо обработать, чтобы получить нужную информацию, огромен, поэтому количество публикаций по алгоритмам, позволяющим быстро извлекать информацию из информационного шума, очень велико. Наиболее часто при этом приходится сталкиваться с информационной перегрузкой. Ученые из разных областей знаний знакомы с проблемами, связанными с анализом данных. Нередко сбор данных об изучаемых явлениях требует дорогостоящих устройств, установок и испытаний. Само исследование также может быть длительным. Это означает, что в научно-исследовательских базах данных о причинах и следствиях анализируемых явлений часто может содержаться всего несколько десятков или несколько сотен записей. Преимущества инструментов машинного обучения и интеллектуального анализа данных, в т. ч. возможности поиска значительных зависимостей между многомерными входными и выходными данными, дают возможность исследователям использовать эти инструменты для определения ранее не обнаруженных взаимосвязей изучаемых процессов и явлений. Недостаточное количество записей в созданной базе данных, описывающих какое-либо явление, может снизить ценность полученных результатов анализа. В статье представлены разработки автора, в которых инструменты машинного обучения и интеллектуального анализа данных использовались для исследования материалов и анализа процессов, когда количество входных данных было большим по сравнению с количеством выполненных тестов (т. е. записей в базе данных). Собранные примеры приложений были расширены за счет включения методов подготовки данных и методов оценки точности прогнозов и классификации, чтобы облегчить работу и помочь быстрее достичь ожидаемых результатов людям, которые намерены использовать инструменты машинного обучения для анализа собственных исследований.

Анализ явлений, описываемых многими переменными. Перед любым исследователем непременно встают вопросы: какие входные значения принимать для анализа как влияющие на изучаемое явление, а какие параметры измерять на выходе. Очень полезен бывает статистический подход в исследовании, но он имеет существенный недостаток, который состоит в том, что можно анализировать только одну пару функций. При этом стоит, конечно, определиться, что такое статистика. Согласно [1], «Статистика — это наука о методах проведения статистического обследования и методах анализа его результатов». Предметом же статистического обследования являются отдельный набор объектов, который называется статистическим сообществом (населением), или несколько статистических сообществ. Статистику можно разделить на три основные части: описательная статистика, распределение случайных величин и статистический вывод (рис. 1) [2].

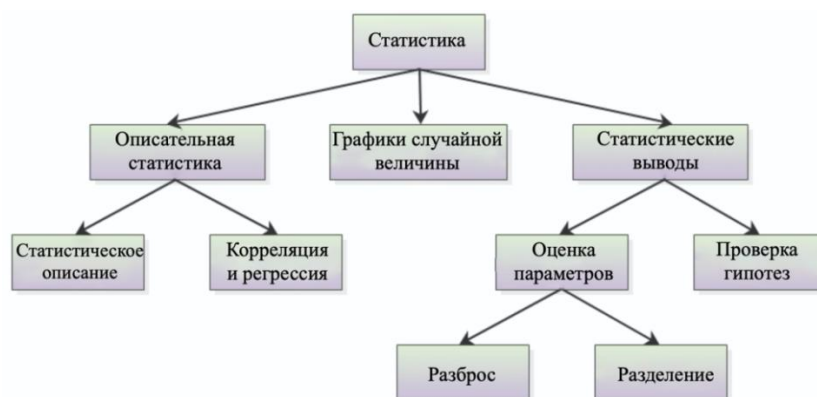


Рис. 1. Статистические управления [2]

В случае, когда на результат процесса влияет множество переменных, с помощью статистических методов очень сложно найти такие комбинации значений входных переменных, которые существенно влияют на изменчивость выходных данных. И самое востребованное — как эффективно управлять процессом или явлением, чтобы на выходе получить желаемый результат. С помощью инструментов интеллектуального анализа данных гораздо проще найти взаимосвязи между многомерными входными и выходными данными. Интеллектуальный анализ данных очень точно определяется самим названием книги [3], которое можно перевести как «Обнаружение знаний из данных». Существует определение интеллектуального анализа данных, сформулированное в 2001 году как анализ (часто огромных) наборов данных наблюдений с целью обнаружения неожиданных взаимосвязей и обобщения данных оригинальным способом, чтобы они были понятны и полезны своему владельцу [4–5]. Для этих нужд разрабатываются методы и алгоритмы, благодаря которым поиск вышеупомянутых соединений происходит быстрее и эффективнее. Методы интеллектуального анализа данных можно разделить на:

- обнаружение ассоциаций (правила ассоциации);
- классификация и прогнозирование;
- группировка;
- анализ последовательности и времени;
- обнаружение характеристик;
- интеллектуальный анализ текстовых и полуструктурных данных;
- изучение контента, размещенного в Интернете;
- изучение графиков и социальных сетей;
- интеллектуальный анализ мультимедийных и пространственных данных;
- обнаружение особенности [6].

На этой основе были разработаны методы, обычно называемые искусственным интеллектом, благодаря которым выполняются наиболее часто выбираемые задачи интеллектуального анализа данных. Несмотря на развитие информационных технологий и возрастающую вычислительную мощность компьютеров, до сих пор практически невозможно проверить все возможные комбинации многомерного ввода и вывода сложной системы [7]. Использование методов искусственного интеллекта тем более оправдано, чем сложнее проблема и не известны механизмы, управляющие ею, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Предлагаемые условия использования методов искусственного интеллекта [7]

Существует множество методов и приемов искусственного интеллекта (включая искусственные нейронные сети, метод К-ближайших соседей, случайный лес, деревья решений), и они все еще разрабатываются¹. Популярность, которую можно прочесть как полезность приложений одного из инструментов искусственного интеллекта — искусственных нейронных сетей — очень заметна, например, на

¹ StatSoft. Internetowy Podręcznik Statystyki. URL: <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (accessed: 10.07.2020).

основе [8]. Вместо строгого поиска возможных комбинаций используется метаэвристика. Если необходимо использовать вышеупомянутые инструменты, следует решить, пользоваться ли специализированным программным обеспечением или создать его самостоятельно с помощью общедоступных модулей (так называемых «движков»), реализующих алгоритмы искусственного интеллекта. Независимо от принятого решения в основе будут лежать данные, которые будут анализироваться.

Подготовка данных. Можно выделить следующие этапы подготовки данных к анализу:

- очистка данных;
- интеграция данных;
- выбор данных;
- консолидация и преобразование данных [6].

Такая подготовка должна выполняться независимо от размера базы данных. Для небольших наборов данных их правильная подготовка даже более важна, чем для больших. Примером может служить сравнение двух наборов данных: один с 10 000 записей, а другой со 100 записями, где 5 % записей относятся к повторяющемуся явлению (повторяемость еще не обнаружена). Когда две записи содержат ошибочные данные, то в первом случае можно найти повторяемость в 4,8 % случаев вместо 5,0 %. Во втором случае повторяемость обнаруживается только в 3,0 %. Разница существенная.

Очистка и интеграция данных. При очистке данных из базы удаляются в основном записи, содержащие неполные данные. В больших базах данных удаление, например, двух записей существенно не повлияет на результаты, полученные на последующих этапах. При небольшом количестве наборов данных потеря даже одной записи может существенно повлиять на полученные результаты анализа. По этой причине отсутствующие значения не могут быть заменены, например, средним для всей генеральной совокупности (один из методов увеличения данных) или ее части (аналогичной описанию в записи, которую следует удалить), как это делается для больших баз данных. Причина та же, что и описана выше — замена одного отсутствующего признака в описании явления может существенно изменить результаты, если анализируется небольшой набор данных. Однако записи, удаленные в процессе, не должны удаляться безвозвратно. На последующих этапах может оказаться, что в окончательно принятой модели данная особенность не будет учтена, а изначально удаленная запись будет содержать полные данные — это будет полезно для анализа.

Второй важный этап очистки данных — это статистический анализ каждой характеристики (столбцов в базе данных) отдельно и ее корреляция с выходными данными. Рекомендуется представлять статистику основных характеристик анализируемого процесса (количество записей, среднее арифметическое, медиана, минимальное и максимальное значение, стандартное отклонение, квартили значений характеристик) также и для функции или функций, описывающих выходные данные. Диаграммы «рамка-усы» очень удобочитаемы (рис. 3).

Давление для образцов с содержанием примесей, МПа

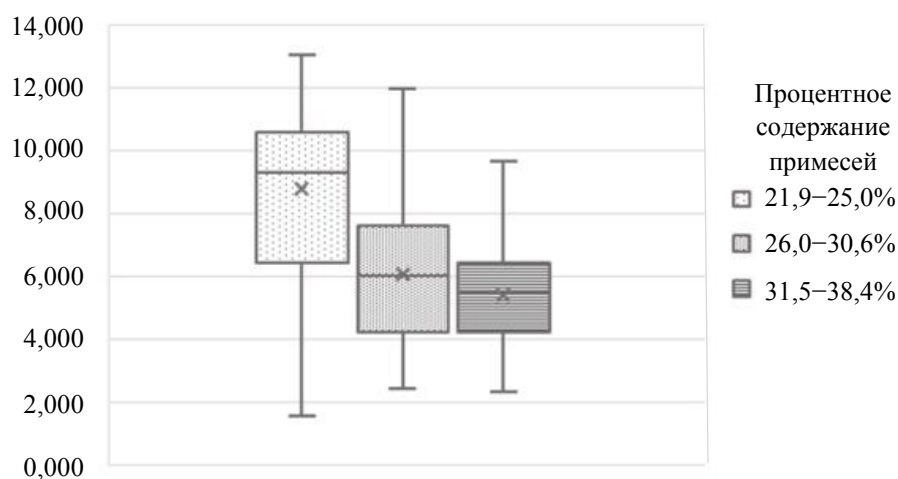


Рис. 3. Пример диаграммы типа «кадр-усы» [9]

На таком графике легко прочесть, например, что для 50 % образцов с 21,9–25,0 % содержания глины с пылью прочность была выше 9 МПа, но при этом минимальная прочность для этого типа образцов была ниже 2 МПа. Для таких образцов прочность была ниже 6,5 МПа. Анализ базовой статистики может облегчить решение об исключении из анализа записей (т. е. образцов или исследуемых явлений), для которых измеренные значения несовместимы со всеми другими случаями. Значительное несоответствие может быть результатом ошибочного измерения или того факта, что на измерение повлиял другой фактор, который вообще не принимался во внимание (он не учитывался и не измерялся ни в одном из случаев). По этим причинам все записи, отклоненные из базы данных, должны быть описаны, а также должны быть указаны причины отклонения [10].

Другой случай. Если обнаружено, к примеру, что решение об отклонении записи может быть принято только после того, как будут выполнены все или часть вычислений. Об этом идет речь в статье [11]: на основе наборов из 95 ускорений (а) стандартизированного молота (ударяющего по испытуемому стальному элементу), измеряемых каждые 0,01 мс с использованием искусственных нейронных сетей, была предпринята попытка отнести испытываемый стальной элемент к одному из девяти классов (рис. 4, 5).

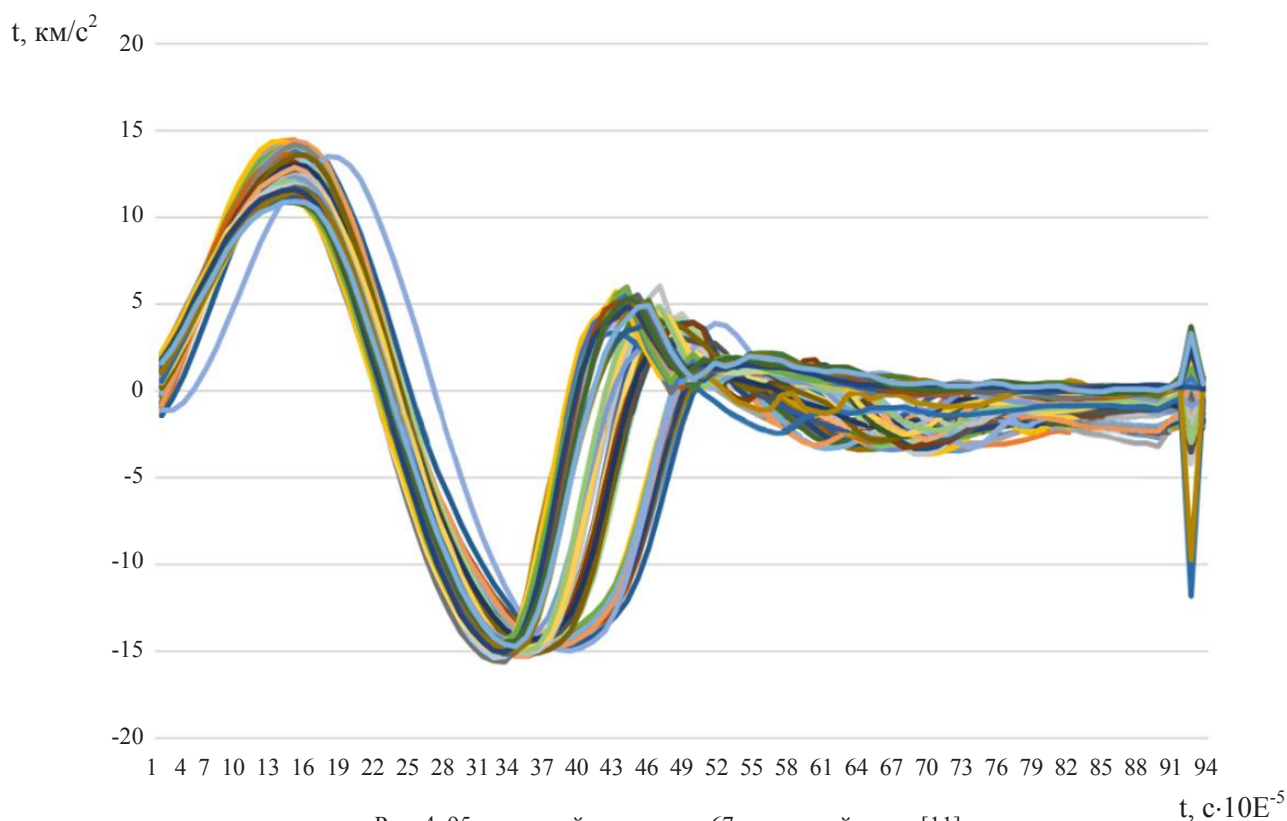


Рис. 4. 95 ускорений молота для 67 испытаний стали [11]

Анализируя ускорения на рис. 4, можно сказать, что один из тестов во временном диапазоне от 0,01 до 0,31 мс отстает от других, но по-прежнему ведет себя как другие образцы. Только предварительная классификация по четырем группам марок стали показала, что через 0,31 мс в испытании № 29 были получены результаты, которые показывают резко отклоняющийся характер результатов также через 0,31 мс (рис. 5). В испытании № 29 был исследован стальной образец, для которого во всех других испытаниях ускорение изменило знак с отрицательного на положительный между 0,424 и 0,450 мс. Для испытания № 29 знак ускорения изменился в пределах 0,460–0,495 мс, то есть за время, подходящее для другой группы марок стали. Только этот вывод позволил достаточно хорошо обосновать отклонение из анализов испытания № 29. В результате была повышена первоначально полученная точность классификации до девяти марок стали по результатам 67 испытаний, равная 80 %, до 95 % (после отказа от теста № 29 и повторного использования искусственных нейронных сетей).

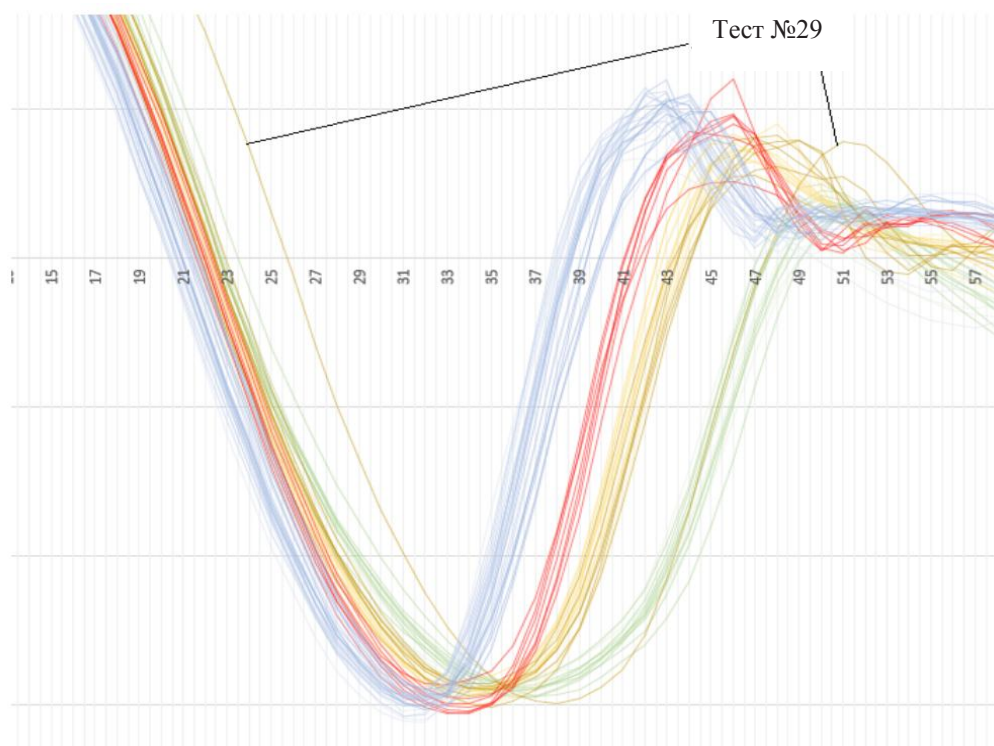


Рис. 5. Фрагмент диаграммы с рис. 4 с предварительной классификацией на четыре группы классов сталей и выпадающим тестом № 29 также через 0,31 мс [11]

Интеграция данных — это объединение данных об одном и том же явлении из разных источников в одну базу данных. Пример интеграции содержится в работе [12], в которой прогнозируется задержка строительства участков скоростных и автомагистралей в Польше. Независимыми переменными, на основании которых делались прогнозы, являются данные о построенных объектах (предусмотренных законом о доступе к информации главного управления национальных дорог и автомагистралей), данные о предприятиях, реализующих эти объекты (собранные в регистрационный суд), Интернет, агентство бизнес-аналитики, макроэкономические данные (с источником в публикациях центрального статистического управления). Значение зависимой переменной (необходимое для «обучения» искусственной нейронной сети) — количество дней, на которое откладывается завершение каждой из проанализированных дорожных инвестиций, искали в публикациях в прессе и в Интернете. Собранная информация была использована для интеграции в базу данных о реализации 128 строительных проектов. В Польше в 2009–2013 годах было построено 156 участков скоростных и автомагистралей, но получить полную информацию о них было практически невозможно. После анализа хода этого строительства были отклонены и те случаи, когда возникали неожиданные нарушения (например, в виде протестов экологов, которые не учитывались в анализах как независимая переменная). Это уменьшило количество дел на 28, но обеспечило полноту, целостность базы данных — основы расчета.

Выбор данных. В больших наборах данных их размер является существенной проблемой — большое количество записей приводит к неэффективной и длительной работе программного обеспечения. В базах данных с небольшими размерами записей программному обеспечению поиска отношений ввода-вывода может быть недостаточно, чтобы найти эти отношения. Бывает, что изучаемое явление можно описать многими параметрами, но в базе данных мало случаев (записей) с описанными параметрами явления. Таким образом, выбор данных означает необходимость выбора лишь нескольких независимых переменных, на основе которых будут выполняться классификация или прогнозирование выходного значения с использованием искусственного интеллекта (также известного как машинное обучение). При выборе независимых переменных может оказаться полезным следующее:

- изучение взаимной корреляции линейных независимых переменных, а также корреляции со значениями на выходе;
- анализ основных компонентов;
- эмпирический поиск оптимального набора независимых переменных.

Корреляционное исследование. Исследование линейной корреляции Пирсона между парами независимых переменных и между каждой из них и зависимой переменной может быть представлено в форме таблицы с числами, а также графически, в виде так называемых «тепловых карт» (пары независимых

переменных) [13]. Переменные наиболее сильно коррелируют положительно, а интенсивный синий цвет на рис. 6 демонстрирует наименьшее значение коэффициента Пирсона. Сильная положительная или отрицательная корреляция, считанная с тепловой карты, не обязывает удалять переменную, сильно коррелированную с другой, это всего лишь предположение, потому что она сильно положительно коррелирует с zn2 (коэффициент корреляции между ними составляет 0,88), и в то же время zn5 не коррелирует с выходом (обозначено как wy, коэффициент корреляции равен 0,03).

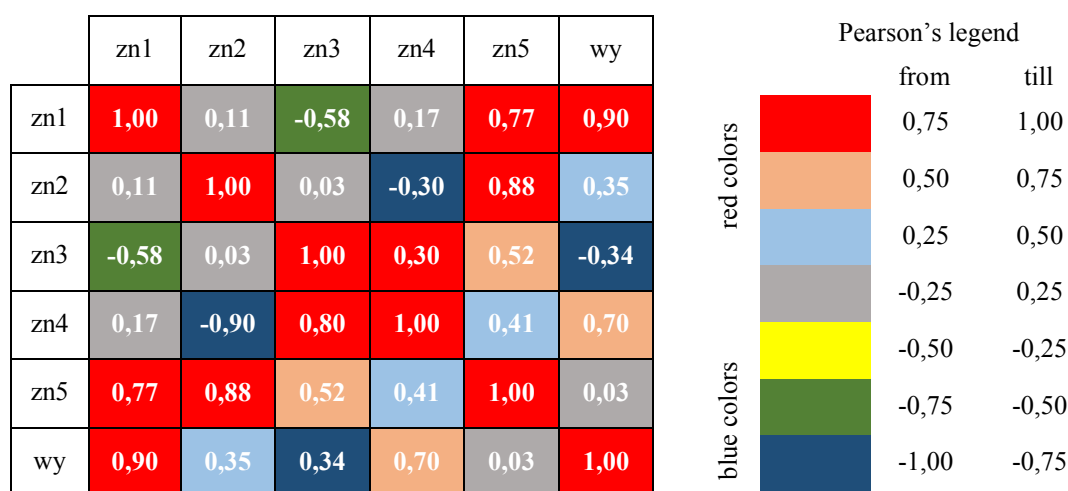


Рис. 6. Примерная «тепловая карта» независимых переменных от n1 до n5 и выходных данных

Хотя вычисляется линейная корреляция, и фактическая связь между независимыми переменными (или независимой переменной и переменной, зависящей от выпуска) может быть не линейной, вычисление этих линейных корреляций часто подсказывает, какие переменные не включать (если есть необходимость их уменьшения). Такая проверка была сделана среди прочего в работах [9, 12]. В [12] количество зависимых переменных было сокращено, а в [9] для анализа была принята новая переменная как сумма значений двух сильно положительно коррелированных независимых переменных (это также было технически оправданно). Переменная, которая имеет сильную отрицательную корреляцию с другой независимой переменной, также может быть удалена из базы данных.

Анализ главных компонент. Анализ главных компонент (PCA) выполняется для независимых переменных — выходное значение не учитывается². В результате получаем рейтинг, показывающий, какая из независимых переменных больше всего влияет на изменчивость наборов независимых переменных. Можно представить, что каждая из независимых переменных осуществляет измерение многомерного пространства. Независимые переменные связаны между собой, они образуют множества (записи в базе данных, описывающие явление). Результатом PCA является ответ на вопрос, какая из независимых переменных наиболее ответственна за то, что расстояния (в многомерном пространстве) между точками (наборы независимых переменных, описанные в записях — координаты точек) являются наибольшими. Переменные, оказывающие наименьшее влияние на разброс данных, это те, которые могут быть удалены из анализа в попытке уменьшить количество независимых переменных. Примеры эффективного применения анализа главных компонент для повышения производительности инструментов машинного обучения можно легко найти, например, в работах [14–16]. Однако стоит иметь в виду, что PCA не принимает во внимание значение зависимой переменной. Следовательно, нет уверенности в том, что именно независимая переменная, которая также оказывает наибольшее влияние на прогнозируемое значение (зависимая переменная), вызывает наибольшую изменчивость в наборах данных.

Эмпирические исследования. И корреляционное исследование, и анализ главных компонент не дают абсолютной уверенности в том, был ли выбор независимых переменных оптимальным. Оптимальный — это значит наиболее точный прогноз или максимально возможная доля точных классификаций для базы данных и выбранного инструмента машинного обучения. Инструменты искусственного интеллекта чаще всего применяются, когда их пользователь подозревает, что существует связь между вводом и выводом (между наборами независимых переменных и эффектом их совместного появления — зависимой переменной). Когда эти зависимости невозможно описать строго (функцией многих переменных), когда изучаемые процессы и

² StatSoft. Internetowy Podręcznik Statystyki. URL: <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (accessed 10.07.2020).

явления сложны (рис. 2), то использование инструментов машинного обучения может оказаться единственным способом, чтобы узнать об этом. Поэтому трудно ожидать, что какой-либо вспомогательный инструмент точно укажет, какие из зависимых переменных следует использовать для «обучения» искусственного интеллекта. Следовательно, одним из методов поиска оптимального набора входных данных (зависимых переменных) является эмпирическая проверка результатов инструмента искусственного интеллекта на различных наборах зависимых переменных. Есть два основных способа действия: вперед и назад. Вперед — это означает выбор двух зависимых переменных, на основе которых результаты прогноза или классификации являются наилучшими. Выбрать первый порой очень просто, сложно представить прогноз задержек без указания планируемой продолжительности [12, 17]. Чтобы выбрать вторую переменную, проверяем работу инструмента на каждой созданной паре зависимых переменных (их иногда называют предикторами) [18]. Когда выбрана лучшая пара предикторов, один из оставшихся предикторов добавляется последовательно. Это делается до тех пор, пока добавление какой-либо еще не использованной независимой переменной не улучшит результаты. В обратной процедуре первым шагом является использование всех независимых переменных, а затем последовательное удаление только одной, проверка того, какой предиктор был удален, точность прогноза и классификации увеличилась больше всего. Процедура продолжается до тех пор, пока удаление любого из предикторов не приведет к улучшению результатов.

Консолидация и преобразование данных. Консолидация и преобразование данных состоит в том, чтобы они могли использоваться выбранным инструментом интеллектуального анализа данных [6]. Наиболее распространенной формой преобразования данных является их стандартизация, то есть такое преобразование значений независимых переменных и зависимой переменной, при котором они принимают значения из одного и того же диапазона. Стандартизация данных является результатом необходимости предоставить каждой из независимых переменных «равные условия для игры», которые будут включены в модель машинного обучения. В [12] дана формула:

$$\text{для } 1 \leq i \leq k \quad a_{1i} = \frac{a_{0i}}{\max_k(a_{0i})} \quad (1)$$

где k — количество записей в базе данных;

a_{0i} — i -й элемент переменной a до стандартизации;

a_{1i} — i -й элемент переменной a после стандартизации.

Второй широко используемый тип стандартизации данных — это так называемая стандартизация «к нулевому среднему значению и стандартному отклонению единицы», определяемая следующей формулой:

$$a_{1i} = \frac{a_{0i} - \bar{a}_0}{\sigma_a} \quad (2)$$

где $\bar{a}_0$ — среднее арифметическое значение переменной a до стандартизации;

a_{0i} — i -й элемент переменной a до стандартизации;

a_{1i} — i -й элемент переменной a после стандартизации;

σ_{0a} — стандартное отклонение переменной a до стандартизации [7].

Другие типы стандартизации, также нелинейные, можно найти, например, в [19]. Однако следует помнить, что тип стандартизации данных может изменить результаты, полученные с помощью машинного обучения [20]. Таким образом, тип стандартизации данных может быть одним из параметров, которые инструмент настраивает для получения наилучших результатов.

Бинаризация может быть вторым процессом преобразования данных. Она означает преобразование числовых значений переменной только в два значения (например, 0 и 1) по следующей формуле [22]:

$$a_{1i} = \begin{cases} a_{0i} \leq p \rightarrow 0 \\ a_{0i} > p \rightarrow 1 \end{cases} \quad (3)$$

где a_{0i} — i -й элемент переменной a до бинаризации,

a_{1i} — i -й элемент переменной a после бинаризации,

p — параметр, выбранный пользователем.

Бинаризация данных особенно полезна при поиске правил с использованием анализа корзины (также известного как анализ ассоциации)³. Этот тип анализа был создан для исследования содержимого корзины клиентов с целью увеличения продаж. Компьютерные программы с модулем анализа корзины работают наиболее эффективно, если переменные являются двоичными (данный товар присутствовал в корзине покупателя или нет). Можно сформулировать множество научных задач, сама суть которых является двоичной, но в большинстве случаев описание явления включает числа, которые преобразуются в двоичную форму для применения анализа корзины [21–22]. Такое преобразование также может быть выполнено для переменной,

³ StatSoft. Internetowy Podręcznik Statystyki. URL: <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (accessed 20.07.2020).

которая может принадлежать нескольким непересекающимся подмножествам. Затем два дихотомических подмножества (являющиеся суммами исходных подмножеств) создаются из первичных подмножеств. Тогда, если a_{0i} принадлежит одному из них, то a_{1i} равно 0, если другой равен 1.

Измерения ошибок. До сих пор автором использовались общие термины, такие как «точность прогнозов», «правильность классификации», которые можно назвать качеством или эффективностью инструментов искусственного интеллекта. Однако, если проанализировать способы повышения качества их работы, то необходимо определить ошибки в результатах действия инструментов машинного обучения и итогах интеллектуального анализа данных.

Ошибки прогноза. Инструменты машинного обучения в основном служат двум целям: для прогнозирования значений (регрессия) и для автоматической классификации. Использование одних и тех же общепринятых мер ошибок облегчает понимание работы, но также позволяет легче оценить ценность прогноза. Предполагается, что анализируется абсолютное значение ошибки. Следовательно, абсолютная ошибка (АЕ) [7, 18] может быть определена как

$$AE = |\hat{b} - b| \quad (4)$$

где $\hat{b}$ — прогнозируемое значение;

b — фактически наблюдаемое значение.

Относительная ошибка, выраженная как абсолютная ошибка в процентах (АРЕ), определяется как

$$APE = \left| \frac{\hat{b} - b}{b} \right| * 100\% \quad (5)$$

Чтобы иметь возможность оценить качество прогнозов, сделанных с помощью инструмента искусственного интеллекта (например, искусственной нейронной сети), некоторые данные не используются в процессе «обучения». После построения модели вводится этот набор данных, называемый проверочной выборкой, и машина делает прогнозы. Таким образом, прогнозируемые значения составляют дюжину, несколько дюжин или больше. Затем для оценки качества прогнозов можно рассчитать среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE):

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{\hat{b}_i - b_i}{b_i} \right| * 100\% \right)}{n} \quad (6)$$

где n — размер валидационной выборки.

Наиболее распространенной мерой погрешности (проверочный тест) является среднеквадратичная ошибка (MSE), определяемая как

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{b}_i - b_i)^2}{n} \quad (7)$$

При решении задач регрессии большинство инструментов машинного обучения благодаря использованию эвристических алгоритмов ищет отображение ввода и вывода, которое минимизирует MSE. При указании качества полученных прогнозов наиболее распространенными являются MSE или MAPE (или оба). Следует отметить, что в случае MAPE не имеет значения, рассчитывается эта ошибка для стандартизованных или реальных значений — MAPE то же самое. В случае с MSE дело обстоит иначе. Эта ошибка чаще всего имеет разные значения для стандартизованных прогнозов и для прогнозов, преобразованных в истинные значения (без стандартизации). Следовательно, необходимо указать, для каких значений MSE были рассчитаны. Сравнение точности прогнозов (различных процессов, явлений с разными инструментами) на основе MSE оправдано, если MSE рассчитывается для стандартизованных значений. С другой стороны, с точки зрения практического применения важнее MAPE или максимальное значение АЕ. Полезность получаемых прогнозов также является важным вопросом [23]. Прогноз косвенных затрат на строительство со средней относительной погрешностью 6% можно считать очень точным и полезным прогнозом, но те же 6 % MAPE для прогнозов фондовой биржи делают их бесполезными [24]. Следовательно, размер ошибки, полученной в прогнозах, также следует оценивать с точки зрения полезности для лиц, принимающих решения, использующих прогнозы.

Меры точности классификации. При использовании инструментов машинного обучения для автоматической классификации отнесение случая к неправильному классу можно оценить двумя способами. Во-первых, просто как ошибка. Однако одной информации о том, что инструмент правильно классифицирует 90 % случаев, может оказаться недостаточно. Если есть несколько классов, которым назначены отдельные случаи (описанные в базе данных) (например, восемь), может случиться так, что для пяти классов классификация будет на 100 % правильной, а 10 % ошибок относятся к другим трем классам. Поэтому качество результатов классификации оценивается так называемой матрицей ошибок, пример которой представлен в таблице 1.

Таблица 1

Результаты классификации тендерных процедур по валидационной выборке [25]

	Класс: свободный от сговора	Класс: подозрение в сговоре	Класс: сговор очень вероятный	Всего: для всех классов
Численность в валидационной выборке	52	14	4	70
Количество правильных классификаций	50	10	3	63
Количество неправильных классификаций	2	4	1	7
Доля правильных классификаций, %	96,15	71,43	75,00	90,00
Доля неправильных классификаций, %	3,85	28,57	25,00	10,00

Значительные различия в точности классификации отдельных подмножеств могут способствовать дальнейшему поиску еще более точной модели классификации. Матрица ошибок также может содержать информацию, к какому неправильному классу была неправильно отнесена данная запись из выборки проверки. Это влияет на вывод, основанный на прогнозах. Проанализируем пример из таблицы 1 со следующими предположениями:

- два неправильно классифицированных делопроизводства из класса «свободный от сговора», отнесенных автоматическим классификатором к классу «подозрение в сговоре»;
- четыре неправильно классифицированных случая из класса «подозрение в сговоре» были отнесены автоматическим классификатором к классу «очень вероятный сговор»;
- один неправильно классифицированный случай из класса «очень вероятный» был отнесен автоматическим классификатором к классу «подозрения в сговоре».

В результате анализа можно констатировать, что до тех пор, пока классификатор не отнесет данную процедуру к классу «свободный от сговора», можно быть уверенным, что это производство не связано со сговором. Все дела, отнесенные к этому классу, были правильно классифицированы автоматическим классификатором (несмотря на точность классификации менее 100 %). Этот эффект использовался, например, в [11]. Следовательно, стоит проанализировать, к каким классам автоматически был отнесен данный случай.

Ошибкой классификации в медицинских приложениях является разделение ошибок только на два класса, где так же важно не вводить лекарства здоровому человеку, как и не отказывать в лечении действительно больному человеку (принимая его за здорового) (рис. 7).

		Класс присваивается классификатором	
		Положительный	Отрицательный
Отсортированный класс	Положительный	Количество положительных верных, определенных, как TP	Количество отрицательных неверных, определенных, как FN
	Отрицательный	Количество положительных неверных, определенных, как FN	Количество отрицательных верных, определенных, как TN

Рис. 7. Матрица ошибок классификации на два класса; серый фон указывает на правильную классификацию⁴ [26]

⁴ PQStat Statystyczne Oprogramowanie Obliczeniowe. URL: https://pqstat.pl/?mod_f=diagnoza (accessed 10.07.2020).

Для n классифицированных случаев выполняется следующее равенство:

$$n = TP + FP + TN + FN \quad (8)$$

Для интерпретации матрицы ошибок в форме, представленной на рис. 7, используются понятия точности, прецизионности, чувствительности, специфичности, определяемые следующими уравнениями⁵ [26]:

$$\text{точность} = \frac{TP+TN}{n} \quad (9)$$

$$\text{прецизионность} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (10)$$

$$\text{чувствительность} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (11)$$

$$\text{специфичность} = \frac{TN}{FP+TN} \quad (12)$$

Однако следует помнить, что указанные выше индикаторы применимы лишь в том случае, если инструмент классифицирует только два класса.

Определение значимости обнаруженных ассоциативных правил. Благодаря использованию анализа корзины — одного из инструментов интеллектуального анализа — в данных обнаруживаются правила, которые можно записать как

$$b \rightarrow h \quad (13)$$

где b — предшественник; h — приемник правила.

Такое правило читается так: если был предшественник, то был и приемник. И предшественник, и последующий могут состоять из нескольких переменных, но наиболее часто ищутся правила, в которых предшественник описывается многими переменными, а последующий — одним (например, если давление упало утром, а температура в полдень превысила 30°C, потом днем была гроза). Такое правило (как в примере выше) не всегда работает. Следовательно, мерами качества обнаруженных правил являются не меры ошибок, а три параметра (пропорции) [6, 9], благодаря которым можно легко определить, что правило будет проверено в случае нарушения предшественника [3, 4, 6]:

— поддержка — помечено как *sup* (от англ. support);

— уверенность — обозначается как *conf* (от англ. confidence);

— увеличение — отмеченный как *lift* (от англ. lift).

Поддержка определяется следующим образом:

$$\text{sup}(b \rightarrow h) = \frac{n(b \rightarrow h)}{N} \quad (14)$$

где $n(b \rightarrow h)$ — количество случаев, в которых возникновение предшественника сопровождалось появлением наследника; N — количество всех случаев в базе данных.

С другой стороны, достоверность правила определяется следующим образом:

$$\text{conf}(b \rightarrow h) = \frac{n(b \rightarrow h)}{n(b)} \quad (15)$$

где $n(b)$ — количество случаев, в которых было отмечено появление предшественника.

Не менее важно приращение правила. Если его значение меньше 1, это означает, что найденное правило не объясняет появления наследника. Приращение определяется следующим образом:

$$\text{lift}(b \rightarrow h) = \frac{\text{conf}(b \rightarrow h)}{P(h)} \quad (16)$$

где $P(h)$ — вероятность приемника (независимо от того, был ли предшественник или нет).

Лучшему пониманию оценки качества обнаруженных ассоциативных правил будет способствовать пример, в котором в 12 процессах было сделано 10 наблюдений за возникновением предшественника и последующего (рис. 8). Для правила «если предшественник, то наследник» были рассчитаны поддержка, достоверность и приращение (для каждого из процессов), которые представлены в таблице 2.

⁵ PQStat Statystyczne Oprogramowanie Obliczeniowe, там же.

№ процесса		№ последовательного наблюдения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	появление предшественника										
	появление наследника										
2	появление предшественника										
	появление наследника										
3	появление предшественника										
	появление наследника										
4	появление предшественника										
	появление наследника										
5	появление предшественника										
	появление наследника										
6	появление предшественника										
	появление наследника										
7	появление предшественника										
	появление наследника										
8	появление предшественника										
	появление наследника										
9	появление предшественника										
	появление наследника										
10	появление предшественника										
	появление наследника										
11	появление предшественника										
	появление наследника										
12	появление предшественника										
	появление наследника										

Рис. 8. Наблюдения за появлением предшественника и преемника в 12 процессах

Сравнивая процессы 5 и 6, следует отметить, что высокая степень достоверности правил не всегда важна. В процессе 6 преемник почти всегда присутствует, и обнаруженное правило не объясняет возникновение преемника (подъем < 1). Это не относится к процессу 8. Приращение указывает на важность правила, в то время как его достоверность низкая. Тем не менее, каждое наблюдение за преемником сопровождается наблюдением за предшественником. В случае процесса 8, следовательно, стоит уточнить предшественник (например, добавив еще одну переменную). В этом случае, вероятно, другой параметр (пока не включенный в предшественник) влияет на наличие преемника (в процессе 8).

Таблица 2

Оценка правил с использованием *sup*, *conf* и *lift* для процессов на рис. 8

№ процесса	Поддержка (<i>Sup</i>)	Уверенность (<i>Conf</i>)	Увеличение (<i>Lift</i>)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,25	0,63
3	0,20	0,50	1,25
4	0,20	0,67	1,67
5	0,30	0,75	1,88
6	0,30	0,75	0,94
7	0,40	1,00	1,00
8	0,20	0,25	1,25
9	0,20	1,00	1,25
10	0,30	0,75	0,83
11	0,40	1,00	2,50
12	0,20	0,50	2,50

Важные аспекты применения выбранных инструментов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных к небольшим базам данных

Количество записей в базе данных и сложность инструмента. В статистике чаще всего предполагается, что небольшой размер выборки составляет менее 30 случаев, однако можно обнаружить, что предельное число, за пределами которого мы не можем говорить о малой выборке, составляет 100 [27–28]. Инструментам искусственного интеллекта нужны полные наборы данных (входы и выходы), чтобы иметь возможность найти наиболее точный способ преобразования одного в другой. Чем сложнее проблема, тем больше требуется наборов данных (записей в базе данных). В глубоком обучении, когда инструмент преподается не с наборами чисел, а с файлами (графикой, аудио, текстом), необходимы тысячи наборов данных. В [29] более 4000 стандартизированных изображений использовалось для прогнозирования прочности на сжатие. В других исследованиях образцов было немного (например, в [11] всего 66). Есть указание на то, что для искусственных нейронных сетей количество связей между нейронами должно быть в 10 раз меньше, чем количество записей в базе данных [30]. Небольшие базы данных требуют большего количества вычислительных испытаний и более точной настройки используемых инструментов. Тем не менее, правило, что чем сложнее проблема и ее модель, тем больше наборов данных требуется для обучения инструмента, остается в силе. Использование сложных моделей (например, искусственных нейронных сетей с более чем одним скрытым слоем и множеством нейронов в скрытых слоях) в небольших базах данных чаще всего приводит к ошибкам (прогнозирования или классификации), намного большим, чем в моделях с меньшей сложностью самого инструмента. Отсюда популярность методов уменьшения количества независимых переменных, описанных в разделе 3. Когда количество наборов данных слишком мало, уменьшение количества независимых переменных чаще всего повышает точность прогнозов и классификации.

Тип вывода и качество прогноза и классификации. В [30] можно найти предположение, что искусственные нейронные сети могут более точно определить, будет ли, например, предсказанное значение больше, чем значение, данное пользователем сети. Ссылаясь на требование полезности прогноза [23], если полученные прогнозы недостаточно точны (т. е. ошибки прогноза слишком велики), можно решить, требуется ли точное значение. Например, при прогнозировании прочности материала возможно вместо прогноза лишь сообщить, что прочность не будет ниже предполагаемой прочности, указанной пользователем. То же самое и с проблемой классификации. Автоматическая классификация стали на 9 марок на основе всего 66 записей в базе данных не позволила получить точность классификации выше 80% [11]. Затем один процесс классификации был заменен восьмью, в результате чего результаты испытаний стали были разделены на две дихотомические подгруппы, как показано на рис. 9.

		Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4	Этап 5	Этап 6	Этап 7	Этап 8
Дихотомические подмножества на каждом этапе	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1	Stal 1
	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2	Stal 2
	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3	Stal 3
	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4	Stal 4
	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5	Stal 5
	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6	Stal 6
	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7	Stal 7
	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8	Stal 8
	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9	Stal 9

Рис. 9. Восьмизападный процесс классификации на два дихотомических подмножества (на каждом этапе классификации) [11]

Автоматическая классификация только двух подмножеств была проведена с помощью более простой модели (со сложностью, соответствующей количеству испытаний стали, т. е. 66). Используемый восемь раз процесс позволил повысить точность классификации с 80 до 95 %. Из первоначально выбранных 12 предикторов осталось только 6 [12]. Это позволило сделать прогноз с достаточно малой ошибкой, чтобы

модель была полезной. Компьютерные программы позволяют прогнозировать, например, две зависимые переменные одновременно, но по причинам, описанным выше, лучшие результаты (меньшие ошибки) получаются при прогнозировании двух зависимых переменных отдельно, с помощью двух моделей, хотя результаты получаются на одном и том же наборе данных.

Модификация вывода. Рассмотрим случай, когда на начальном этапе расчетов не получаются достаточно точные прогнозы или классификации. В дополнение к действиям, связанным с данными и сложностью в инструменте машинного обучения, использованном выше, можно рассмотреть возможность поиска другой зависимой переменной, той, на основе которой можно будет вычислить строго зависимую переменную, которую необходимо найти. При небольшом количестве записей в базе данных это может упростить модель, что, в свою очередь, может повысить точность прогнозов. Этот эффект был использован в [31], где прогнозирование с помощью искусственной нейронной сети является лишь частью процесса проектирования состава смеси. Еще одна процедура, которая может уменьшить ошибки прогнозов, — это прогноз относительного значения (вместо абсолютного значения). При оптимизации работы модели в [12] прогнозируемая задержка, выраженная в днях, была заменена задержкой, выраженной как пропорция количества дней задержки к запланированному количеству дней строительства. В указанном случае это не уменьшило ошибок в прогнозах. Другая возможность изменить тип вывода (т. е. прогнозируемую зависимую переменную) — заменить одно число несколькими значениями функций принадлежности, рассчитанных на основе теории нечетких множеств [32]. В [17] вместо количества дней задержки построения на выходе из искусственной нейронной сети использовались три значения функции принадлежности множеств: низкая задержка, средняя задержка и большая задержка. После уточнения прогнозируемых значений оказалось, что ошибки прогноза были меньше, чем при прогнозировании количества дней задержки [12]. То же самое было предпринято в [33] путем прогнозирования значений функции принадлежности на первом этапе вычислений, и только на втором этапе на основе этих прогнозов случаи были разделены на три подмножества. Однако в этом случае прямое использование искусственной нейронной сети в качестве классификатора привело к повышению точности классификации.

Гибридные инструменты. При небольшом количестве кейсов в базе данных используемый инструмент машинного обучения не может быть очень сложным, поскольку слишком мало кейсов для успешного обучения модели. Гибридные модели могут быть средством от слишком большой ошибки прогноза или слишком низкой точности классификации. Вместо одного сложного инструмента используются два более простых. В вышеупомянутом примере [17] применение теории нечетких множеств фактически добавляет к модели два элемента, которые можно правильно «настроить». Схема модели представлена на рис. 10.



Рис. 10. Три модуля нейронечеткой модели [17]

Первый модуль — это преобразование точных чисел в значения трех функций принадлежности. Второй — настроить сеть для прогнозирования этих трех значений с наименьшей ошибкой, а третий — повысить точность полученных прогнозов до точных цифр. Операции в каждом из этих трех модулей могут выполняться по-разному, поэтому для моделирования зависимой переменной можно использовать три инструмента, а не только саму искусственную нейронную сеть. Есть много примеров, когда гибридные модели, то есть те, в которых более одного инструмента используются совместно, дают более точные прогнозы, чем модели с одним инструментом [34–35]. Поэтому при анализе результатов исследований стоит рассмотреть возможность использования инструментов машинного обучения вместе с другими математическими инструментами.

Извлечение проверочного подмножества. Для обучения искусственных нейронных сетей из существующей базы данных выделяются три подмножества, содержащие как независимые, так и зависимые переменные: обучение, тестирование и проверка. Обучающее подмножество используется для обучения инструмента. Этот процесс продолжается до тех пор, пока MSE не перестанет уменьшаться в тестовой выборке, затем процесс обучения сети останавливается. Дальнейшее обучение сети могло бы привести к лучшему согласованию инструмента с обучающими данными, но возможности обобщения были бы потеряны (ошибки MSE для тестовой и проверочной выборки были бы намного выше) [30]. Такой эффект, называемый переобучением искусственной нейронной сети, схематично показан на рис. 12.

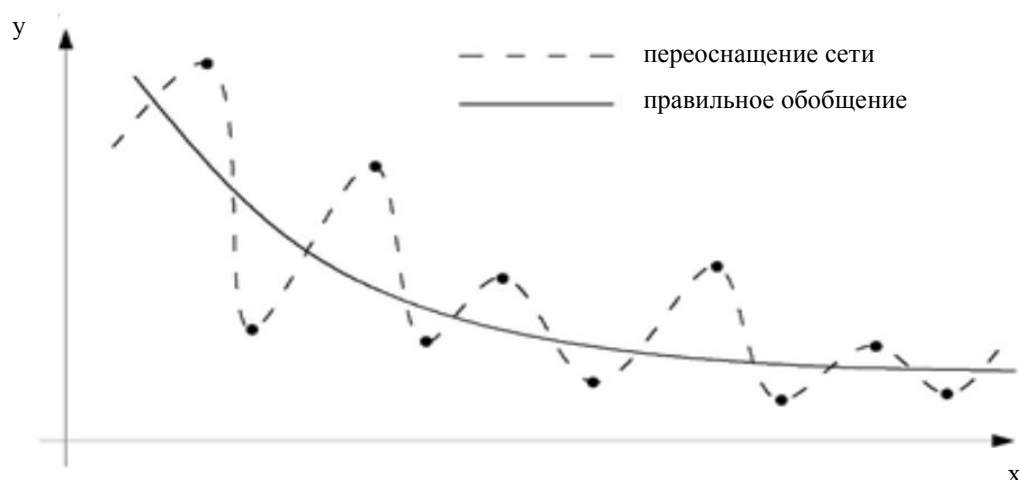


Рис. 12. Схематическое изображение переобучения искусственной нейронной сети и правильно обнаруженного тренда [30, 31]

Подмножество валидации используется для оценки качества прогнозов или классификации. Эти наборы независимых переменных и зависимая переменная не видят сеть в процессе обучения. Поэтому прогнозы (или классификации) делаются для проверочного подмножества, и путем сравнения с известными зависимыми переменными могут быть вычислены ошибки, описанные в предыдущих разделах. Очень важно указать, к какому подмножеству относится вычисленная ошибка. Один из методов оценки того, не переоборудован ли инструмент, — это сравнение ошибок (чаще всего MSE) для вышеупомянутых трех подмножеств, они должны быть на аналогичном уровне. Явно более низкая MSE для обучающего подмножества может указывать на переобучение, а явно более высокая MSE — на несовершенство инструмента. Явно более низкая MSE для тестовой и проверочной выборки предполагает необходимость выбора других параметров искусственной нейронной сети или других зависимых переменных (или даже другого инструмента).

Для больших баз данных подходит случайное разделение данных на три подмножества. В литературе встречаются предложения о том, что пропорции размера этих подмножеств должны быть в диапазоне 60:20:20–70:15:15 (преподаватель: тест: проверка) [36–37]. Для небольших баз данных случайный выбор подходит только в тех случаях, когда различные диапазоны зависимой переменной (или класса для классификации) одинаково численно представлены. Чаще всего это условие не выполняется. Тогда было бы хорошо обеспечить такое сбалансированное представление во всех трех подмножествах. Такая контролируемая разбивка данных использовалась в [11, 25]. В [11] из 66 испытаний стали одна марка (5 испытаний) была наименее многочисленной, а марка с 12 испытаниями — самой многочисленной. При случайном выборе тестов для подмножеств могло случиться так, что в обучающую подгруппу не было включено ни одного теста какой-либо марки стали, что, несомненно, помешало бы его автоматическому распознаванию. В [25] из 249 проанализированных дел только девять, по мнению авторов, следует отнести к категории «весьма вероятный сговор». После раздела набора данных на подмножества четыре из этих процедур были назначены обучающими, одна — тестовой и четыре — проверочными. Благодаря этой процедуре три из четырех процедур из набора для валидации могут быть правильно классифицированы.

В польской и англоязычной литературе можно найти примеры того, что авторы используют только концепции обучающего набора данных, тестового набора данных. Вероятно, это происходит по двум причинам. Некоторые компьютерные программы полностью (без вмешательства пользователя) контролируют, не переоборудован ли инструмент. Затем извлекается только проверочный набор (либо путем указания его количества или процентной доли в общих данных, либо путем выбора записей, которые будут использоваться для проверки). В этом случае подмножество проверки часто называют подмножеством тестов. Вторая причина

заключается в том, что некоторые инструменты машинного обучения (например деревья классификации, деревья C&RT⁶) защищены от переобучения другим способом, нежели контроль MSE для тестовой выборки. Качество этих инструментов можно проверить с помощью тестового подмножества (точно так же, как подмножество валидации — не участвуя в процессе обучения инструмента). Обычно уже при чтении работ по машинному обучению становится ясно, были выделены два или три подмножества данных, поэтому различная номенклатура набора, используемого для оценки качества работы, не является проблемой.

Проверка качества модели. Базы данных с небольшим количеством записей, используемые для построения модели на основе машинного обучения, делают модель менее устойчивой (т. е. дают существенно разные ошибки) при замене записей между подмножествами (обучение, тестирование и проверка). Чтобы узнать, работает ли построенная модель хорошо только с определенным разделением данных на подмножества, ее следует запустить на рандомизированных подмножествах. Используя предложения по пропорции разделения данных, их можно поделить на 5–7 подмножеств, и процессов построения модели должно быть выполнено как можно больше, так что на каждой итерации будет происходить обучение. Такая проверка качества модели называется перекрестной проверкой (на английском языке наборы данных при перекрестной проверке называются «свертками»). Ошибки MSE или MAPE затем усредняются. Если, однако, в каком-либо наборе данных ошибки значительно отклоняются от среднего значения, следует поискать причину этого.

Независимо от размера базы данных оценку ошибок также следует рассматривать через призму полезности результатов. Прогнозы с относительно большими ошибками, явления, которые нельзя точно описать, могут быть очень полезными и считаться важными. С другой стороны, прогнозы с теми же MSE или MAPE другого явления могут не дать какой-либо новой информации об изучаемом явлении. Поэтому, помимо числовых значений точности прогноза или точности классификации, важно ссылаться на само изучаемое явление.

Также важно проверить, не была ли построена другая модель для ранее изученного явления. Если да, то ссылка на эти предыдущие исследования (относительно уровня полученных там ошибок) также подтвердит качество нового патентованного решения. Если такие модели ранее не создавались, можно проверить качество нового решения, сравнив результаты с гораздо более простой моделью (например, на основе Microsoft Excel с надстройкой Solver).

Существует вопрос, на который пока нет четкого ответа: означает ли небольшое количество наборов данных, что полученные прогнозы, классификации и правила ассоциации неактуальны (именно из-за их небольшого количества)? Например, сложное и строгое правило со следующими индексами $sup = 0,01$, $conf = 1$, $lift = 100$ для базы данных с 10000 записями означает, что каждый раз, когда конкретный предшественник встречается 100 раз, указанный предшественник всегда (sic!) является последующим. То же правило для базы данных из 100 записей означает, что был только один уникальный случай, когда указанный предшественник имел место. Затем его сопровождал конкретный преемник. В одном случае нельзя говорить о правиле, но можно о случае (случайности). Однако, даже для небольшой базы данных (например, со 100 записями) правило 100-процентной достоверности, поддерживаемое тремя случаями, может уже указывать на повторяемость (при условии, что приращение для этого правила больше единицы).

Существуют небольшие базы данных обычно потому, что они малы сами по себе, потому что подготовка более крупных дорогостоящая, требует очень много времени, они к тому же могут быть следствием природы явления (например, ограниченное количество объектов, построенных одной и той же компанией). В реальности эти базы данных не могут быть расширены (в несколько раз или в несколько десятков раз). Изучение таких баз данных при соблюдении условий, описанных в этой главе, может привести к появлению новых, пока не обнаруженных зависимостей. Построенные, правильно функционирующие модели могут быть неприменимы напрямую к другим подобным явлениям, но они могут эффективно указывать на методы поиска общих взаимосвязей в случаях, когда количество наборов данных значительно больше.

Уникальные правила ассоциации или неожиданные автоматические классификации также могут указывать на области, на которых следует сосредоточить дальнейшие исследования описываемых явлений.

Заключение. Обсуждаемые в статье проблемы и вопросы, связанные с поиском взаимосвязей между многомерными входными и выходными данными, представлены в небольшом количестве случаев. Данная работа поэтому не может являться исчерпывающим обзором по теме. Объем статьи и ограниченный опыт автора в применении методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных не позволяют описать большинство используемых методов. Проблемы при расчетах (в основном на небольших базах данных), содержащиеся в упомянутых в тексте работах, и их решения систематизированы таким образом, чтобы

⁶ StatSoft. Internetowy Podręcznik Statystyki. URL: <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (accessed 20.07.2020).

соблюдалась последовательность действий: от подготовки базы данных до расчетов, до обсуждения результатов. Невозможно четко указать, сколько записей в базе данных может свидетельствовать о «малой» или «большой» базе данных. Однако можно сказать, что для эффективного использования инструментов машинного обучения или интеллектуального анализа данных требуется как минимум несколько десятков записей. Применяя соответствующие процедуры (разработка входных данных, построение моделей), можно применять эти инструменты для успешного моделирования и изучения явлений, описанных всего в нескольких десятках случаев. На основе проведенных расчетов возможно сделать надежный вывод.

Бибблиографический список

1. Lissowski, G. Podstawy statystyki dla socjologów. Opis statystyczny. Tom 1 / G. Lissowski, J. Haman, M. Jasiński. — Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar, 2011. — 223 p.
2. Stanisławek J. Podstawy statystyki: opis statystyczny, korelacja i regresja, rozkłady zmiennej losowej, wnioskowanie statystyczne / J. Stanisławek. — Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010. — 212 p.
3. Larose, D. T. Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining. 2nd ed. / D. T. Larose, C.D. Larose. — Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2016. — 309 p.
4. Larose, D. T. Metody i modele eksploracji danych / D.T. Larose. Warszaw: PWN, 2012. — 337 p.
5. Hand, D. Principles of Data Mining / D. Hand, H. Mannila, P. Smyth. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2001. — 322 p.
6. Morzy, T. Eksploracja danych. Metody i algorytmy / T. Morzy. — Warszawa: PWN, 2013. — 533 p.
7. Bartkiewicz, W. Sztuczne sieci neuronowe. W: Zieliński JS. (red), Inteligentne systemy w zarządzaniu. Teoria i praktyka / W. Bartkiewicz. — Warszawa: PWN, 2000. — 348 p.
8. Rutkowski, L. Metody i techniki sztucznej inteligencji / L. Rutkowski. — Warszawa: PWN, 2012. — 449 p.
9. Doroshenko, A. Applying Artificial Neural Networks In Construction / A. Doroshenko // In: Proceedings of 2nd International Symposium on ARFEE 2019. — 2020. — Vol. 143. — P. 01029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014301029>
10. Feature Importance of Stabilised Rammed Earth Components Affecting the Compressive Strength Calculated with Explainable Artificial Intelligence Tools / H. Anysz, Ł. Brzozowski, W. Kretowicz, P. Narloch // Materials. — 2020. — Vol. 13. — P. 2317. <https://doi.org/10.3390/ma13102317>
11. Artificial Neural Networks in Classification of Steel Grades Based on Non-Destructive Tests / A. Beskopylny, A. Lyapin, H. Anysz, et al. // Materials. — 2020. — Vol. 13. — P. 2445. <https://doi.org/10.3390/ma13112445>
12. Anysz, H. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do oceny możliwości wystąpienia opóźnień w realizacji kontraktów budowlanych / H. Anysz. — Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2017. — 280 p.
13. Rabiej, M. Statystyka z programem Statistica / M. Rabiej. — Poland: Helion, Gliwice, 2012. — 344 p.
14. Mrówczyńska, M. Compression of results of geodetic displacement measurements using the PCA method and neural networks / M. Mrówczyńska, J. Sztubecki, A. Greinert // Measurement. — 2020. — Vol. 158. — P. 107693. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107693>
15. Mohamad-Saleh, J. Improved Neural Network Performance Using Principal Component Analysis on Matlab / J. Mohamad-Saleh, B. C. Hoyle // International Journal of the Computer, the Internet and Management. — 2008. — Vol. 16. — P. 1–8.
16. Juszczak, M. Application of PCA-based data compression in the ANN-supported conceptual cost estimation of residential buildings / M. Juszczak // AIP Conference Proceedings. — 2016. — Vol. 1738. — P. 200007. <https://doi.org/10.1063/1.4951979>
17. Anysz, H. Neuro-fuzzy predictions of construction site completion dates / H. Anysz, N. Ibadov // Technical Transactions. Civil Engineering. — 2017. — Vol. 6. — P. 51–58. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.086.6562>
18. Rogalska, M. Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych / M. Rogalska. — Lublin: Politechniki Lubelskiej, 2016. — 154 p.
19. Kaftanowicz, M. Multiple-criteria analysis of plasterboard systems / M. Kaftanowicz, M. Krzemiński // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 111. — P. 351–355. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.102>
20. Anysz, H. The influence of input data standardization method on prediction accuracy of artificial neural networks / H. Anysz, A. Zbiciak, I. Ibadov // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 153. — P. 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.081>

21. Nicał, A. The quality management in precast concrete production and delivery processes supported by association analysis / A. Nicał, H. Anysz // International Journal of Environmental Science and Technology. — 2020. — Vol. 17. — P. 577–590. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02597-9>
22. Anysz, H. The association analysis for risk evaluation of significant delay occurrence in the completion date of construction project / H. Anysz, B. Buczkowski // International Journal of Environmental Science and Technology. — 2019. — Vol. 16. — P. 5396–5374. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1892-7>
23. Zeliaś, A. Prognozowanie ekonomiczne. Teoria, przykłady, zadania / A. Zeliaś, B. Pawełek, S. Wanat. — Warszawa: PWN, 2013. — 380 p.
24. Juszczak, M. Modelling Construction Site Cost Index Based on Neural Network Ensembles/ M. Juszczak, A. Leśniak // Symmetry. — 2019. — Vol. 11. — P. 411. <https://doi.org/10.3390/sym11030411>
25. Anysz, H. Comparison of ANN Classifier to the Neuro-Fuzzy System for Collusion Detection in the Tender Procedures of Road Construction Sector / H. Anysz, A. Foremny, J. Kulejewski // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 471. — P. 112064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/1/112064>
26. Piegorsch, W. W. Confusion Matrix. In: Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. — 2020. — P. 1–4. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat08244>
27. Kot, S. M. Statystyka / S. M. Kot, J. Jakubowski, A. Sokołowski. — Warszawa: DIFIN, 2011. — 528 p.
28. Aczel, A. D. Statystyka w zarządzaniu / A. D. Aczel, J. Saunderson. — Warszawa: PWN, 2000. — 977 p.
29. Narloch, P. Predicting Compressive Strength of Cement-Stabilized Rammed Earth Based on SEM Images Using Computer Vision and Deep Learning / P. Narloch, A. Hassanat, A. S. Trawneh, et al. // Applied Sciences, 2019. — Vol. 9. — P. 5131. <https://doi.org/10.3390/app9235131>
30. Tadeusiewicz, R. Sieci neuronowe / R. Tadeusiewicz. — Kraków: Akademicka Oficyna Wydawnicza, 1993. — 130 p.
31. Anysz, H. Designing the Composition of Cement Stabilized Rammed Earth Using Artificial Neural Networks / H. Anysz, P. Narloch // Materials. — 2019. — Vol. 12. — P. 1396. <https://doi.org/10.3390/ma12091396>
32. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
33. Yagang Zhang. A hybrid prediction model for forecasting wind energy resources / Yagang Zhang, Guifang Pan // Environmental Science and Pollution Research. — 2020. — Vol. 27. — P. 19428–19446. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08452-6>
34. Eugene, E.A. Learning and Optimization with Bayesian Hybrid Models. 2020 American Control Conference (ACC) / E. A. Eugene, Xian Gao, A. W. Dowling. — IEEE. — 2020. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9148007>
35. Neural Network Design / M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, O. De Jesús. — Martin Hagan: Lexington, KY, USA, 2014. — 1012 p.
36. Osowski, S. Sieci neuronowe do przetwarzania informacji / S. Osowski. — Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2006. — 419 p.

Поступила в редакцию 01.10.2021

Поступила после рецензирования 25.10.2021

Принята к публикации 30.10.2021

Об авторе:

Аныш, Хуберт, старший преподаватель факультета гражданского строительства Варшавского технологического университета (Польская Республика, 00-661, г. Варшава, пл. Политехники, 1), доктор философии, [Scopus](https://orcid.org/0000-0001-9148-0007), [Researcher](https://orcid.org/0000-0001-9148-0007), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9148-0007), h.anysz@il.pw.edu.pl

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



UDC 625.7/.8

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375>

Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models



M. M. M. Elshamy^{1,2} , A. N. Tiraturyan¹ , E. V. Uglova¹  

¹ Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

² Al-Azhar University (Cairo, Arab Republic of Egypt)

 uglova.ev@yandex.ru

Introduction. This paper studies the capability of different types of artificial neural networks (ANN) to predict the modulus of elasticity of pavement layers for flexible asphalt pavement under operating conditions. The falling weight deflectometer (FWD) was selected to simulate the dynamic traffic loads and measure the flexural bowls on the road surface to obtain the database of ANN models.

Materials and Methods. Artificial networks types (the feedforward backpropagation, layer-recurrent, cascade backpropagation, and Elman backpropagation) are developed to define the optimal ANN model using Matlab software. To appreciate the efficiency of every model, we used the constructed ANN models for predicting the elastic modulus values for 25 new pavement sections that were not used in the process of training, validation, or testing to ensure its suitability. The efficiency measures such as mean absolute error (MAE), the coefficient of multiple determinations R^2 , Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percent Error (MAPE) values were obtained for all models results.

Results. Based on the performance parameters, it was concluded that among these algorithms, the feed-forward model has a better performance compared to the other three ANN types. The results of the best four models were compared to each other and to the actual data obtained to determine the best method.

Discussion and Conclusions. The differences between the results of the four best models for the four types of algorithms used were very small, as they showed the closeness between them and the actual values. The research results confirm the possibility of ANN-based models to evaluate the elastic modulus of pavement layers speedily and reliably for using it in the structural assessment of (NDT) flexible pavement data at the appropriate time.

Keywords: asphalt pavements, artificial neural networks (ANN), falling weight deflectometer (FWD), backpropagation network, nondestructive test (NDT).

For citation: M. M. M. Elshamy, A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova. Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, p. 364–375. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375>

© Elshamy M. M. M., Tiraturyan A. N., Uglova E. V. 2021



Оценка модуля упругости слоев дорожного покрытия с использованием различных типов моделей нейронных сетей

М. М. М. Елшами^{1,2} , А. Н. Тиратуриян¹ , Е. В. Углова¹ 

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

²Аль-Азхар университет (Каир, Арабская Республика Египет)

✉ uglova.ev@yandex.ru

Введение. Данная статья посвящена исследованию способности искусственных нейронных сетей различных типов прогнозировать модуль упругости слоев нежестких дорожных одежд в условиях эксплуатации. Для моделирования динамических нагрузок дорожного движения и измерения чаш прогибов на поверхности покрытия для получения базы данных моделей ИНС была использована установка ударного нагружения FWD.

Материалы и методы. Были разработаны типы искусственных нейронных сетей (сетей обучающихся по принципу прямого обратного распространения, послонного рекуррентного распространения, каскадного обратного распространения и обратного распространения Элмана) для определения оптимальной модели ИНС с использованием программного обеспечения Matlab. Чтобы оценить эффективность каждой модели были использованы разработанные модели ИНС для прогнозирования значений модуля упругости для 25 новых участков дорожных одежд, которые не использовались в процессе обучения, проверки или тестирования, чтобы убедиться в их пригодности. Для всех результатов моделей были получены такие показатели эффективности, как средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратическая ошибка (RMSE), значения абсолютная процентная ошибка (MAPE).

Результаты исследования. Исходя из параметров эффективности, было сделано заключение, что среди этих алгоритмов модель распространения прямой связи обладает лучшей производительностью по сравнению с тремя другими типами ИНС. Результаты четырех лучших моделей сравнивались друг с другом и с реальными полученными данными для определения наиболее подходящего метода.

Обсуждение и заключения. Различия между результатами четырех лучших моделей для четырех типов используемых алгоритмов были очень малы, так как они показали близость между ними и фактическими значениями. Результаты исследования подтверждают возможность моделей на основе ИНС быстро и надежно оценивать модуль упругости слоев дорожного покрытия для его использования в структурной оценке (NDT) нежестких дорожных одежд.

Ключевые слова: асфальтовые покрытия, искусственные нейронные сети (ИНС), дефлектометр падающего веса (FWD), сеть обратного распространения, неразрушающий тест (NDT).

Для цитирования: Елшами, М. М. М. Оценка модуля упругости слоев дорожного покрытия с использованием различных типов моделей нейронных сетей / М. М. М. Елшами, А. Н. Тиратуриян, Е. В. Углова // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 364–375. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375>

Introduction. All pavement roads will deteriorate over time, regardless of how well designed or constructed [1]. Deterioration of the pavement is affected by traffic volume, climate condition, building quality, layers thickness and the efficiency of earlier rehabilitation and treatment plan. Usually, the pavement condition stays good in the first 50-75 % of service life and the processes of deterioration progress slowly. The degradation processes make rapid progress once the pavement status is decreased [2, 3]. Proper maintenance or repair activities may slow down or reset degradation processes if utilized at a suitable time.

The structural condition of pavements can be evaluated using non-destructive surface deflection testing; impulse load devices such as Falling Weight Deflectometer (FWD) and Heavy Weight Deflectometer (HWD). It is the most frequently used measuring instrument for this objective. Based on the measured pavement responses in deflection tests, material layer modules can be estimated using back-calculation [4, 5].

The FWD load tests simulate traffic characteristics such as type, volume, and time of vehicle loading correctly. These devices apply an impulse load (P) through a mass in free fall on a circular plate with a cylindrical rubber buffer mounted under the falling weight system [6, 7]. The device records the vertical pavement deformation using different sensors located at various distances from the centre of the loading circle [8, 9], as shown in Figure 1. The maximum

displacement is known as the peak deflection, which occurs under the loading point. Traditional methods use the highest values of FWD deflections to back-calculate linear elastic modulus for each layer of pavement [10].

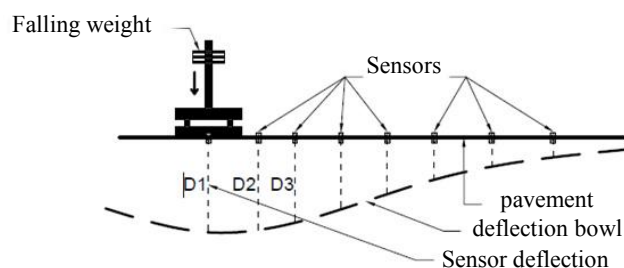


Fig. 1: Pavement deflection according to FWD testing

During the past few years, it has been observed that the pavement administrations use new and different methods of collecting and processing data for road maintenance [11]. Due to the rapid development of information technology and artificial intelligence, there have been multiple opportunities for implementation in developing pavements management systems.

More effective ways to address the problem of specifying (complex, non-linear, multivariate) parameters should be considered. ANN is one of the artificial intelligence techniques that provide solutions to classification and regression problems. It is known as one of the best techniques for data mining tasks. It has a framework for different machine learning algorithms to perform together with data inputs. ANN learns how to predict the output from a set of attributes. The algorithm learns to forecast during the training process, which must include data with a large domain, to avoid a problem of falling the expected data outside that range, which affects the validity of the results [12]. In addition, the frequency of sampling should be sufficient to learn correctly. It has been observed from a lot of research that ANN provided good accuracy in pavement performance prediction. The goal of ANN is to find solutions to problems in a similar manner that a human brain does [13].

In 2004, the authors submitted a formulation for the reverse calculation of the pavement layer modules using artificial neural networks (ANN). The research has shown that the proposed ANN method needs considerably less time computed than other methods such as layered elastic theory, equivalent layer thickness (ELT), and finite-element methods, respectively. The ANN is used in simulation at a high rate because it can learn complex nonlinear relationships [14].

Halil Ceylan et al. and the contributing authors (2008) developed back-calculation models based on artificial neural networks (ANNs) for predicting the elastic modulus of the Portland cement concrete (PCC) layer and the coefficient of subgrade reaction for the pavement foundation. ANN-based models have been trained to estimate the layer modules with deflective basin data (FWD) and the pavement structure thickness. The research indicates that the ANN models can predict the rigid module of paving layers with high precision [15].

More studies were conducted on the development of more accurate and effective models with algorithms of optimization and hybrid systems [16–19].

G. Beltrán and the contributing authors (2014) collected data from field tests to recalculate layer models by artificial neural network models. The results proved the efficiency of the ANN models in calculating the pavements parameters [20].

Maoyun Li and Hao Wang built a model for calculating the elasticity modulus for flexible pavement layers using both the genetic algorithm and the artificial neural network system based on the falling weight deflectometer data. The results of the ANN-GA model showed reasonable accuracy with the data registered in the LTPP test database, where there were no big differences between the predicted values of the elastic modulus for the asphalt surface layer and the registered in the LTPP data [21].

In this investigation, several analyses were performed to define the best possible architecture along with learning rules and the type of the ANN model to increase the forecasting capabilities of ANNs. The used database includes wide ranges of deflection values obtained from impact load tests conducted on existing three-layer pavement systems on the roads network by the State Company Russian Highways from 2014 to 2018. It was utilized as an experimental basis for training artificial neural network models.

Materials and Methods

The properties of the used sections.

In Table 1, the acceptable limits of the pavement layer parameters used in building models are mentioned for calculating the elasticity modulus for the pavement layers (surface, base, and subgrade).

Table 1

Limits of geometries and properties of materials for pavement sections

Material type	Layer thickness (mm)	Poisson's Ratio	Layer elastic modulus (MPa)
Asphalt Concrete	T(AC)= 190 : 220	V = 0.35	$E_1 = 900 : 4500$
Base-layer	T(B)= 350 : 460	V = 0.35	$E_2 = 80 : 500$
Subgrade-layer	T(S)= ∞	V = 0.35	$E_3 = 40 : 150$

Back-calculation models based on ANNs approach.

In this work, we used the back-propagation algorithm function to solve the problem of the nonlinear function mapping, where it has high efficiency between ANN algorithms [22–25]. Furthermore, ANN networks of this type are defined as the neural networks of multilayer feed-forward. The traditional architecture of artificial neural networks is preserved in this algorithm. The structure of this algorithm consists of inputs and outputs represented by neurons, and between them, there are connections used to transfer the weights given to each cell according to its effect. The back-propagating algorithm is characterized by its ability to change the neuron weights to reduce the differences between the goals and the output values of the algorithm using the error reduction technique [26]. The final set of node biases and connection weights is known when the error rate is reduced to permissible limits [27].

The network is trained by different algorithms with the training dataset.

— Feed-Forward Model

The feed-forward network involves at least three layers (the input layer, the hidden layer, and the output layer), and it may increase to have more than one hidden layer according to the network needs. As it is clear from the name of the network, the information has one direction from the input to the hidden layer and then to the output layer, as in Figure 2.

— Layer Recurrent Model

The structures of the recurrent neural network and the feed-forward network are similar, but the recurrent neural network is unique in that there is a specific feedback loop to each layer in the network except for the last layer, as shown in Figure 3. This feedback loop permits the network to have an unlimited dynamic reaction to incoming time series data.

— Cascade Forward Network Model

The Cascade forward network is similar to a feed-forward network, with the only difference being that it includes a link from the input to each layer and from each layer to the following layers. As shown in Figure 4, the Cascade forward model produces links from the first to the second Layer, from Layer 2 to Layer 3, and from the first to the third Layer. These networks also provide input connections for all layers, where additional links can quickly improve the learning process of the network model.

— Elman Neural Network

The Elman neural network structure overrides the feed-forward network by having a layer called the context layer in addition to the input, output and hidden layers. The function of the context layer is to store the output of the hidden layer in each finished cycle and reuse it as input to the hidden layer in the next iteration to ensure that patterns are generated over time, as shown in Figure 5. Elman networks also reduce the error rate in the outputs to the permissible limits by using the back-propagation feature, as is the case in the forward propagation network.

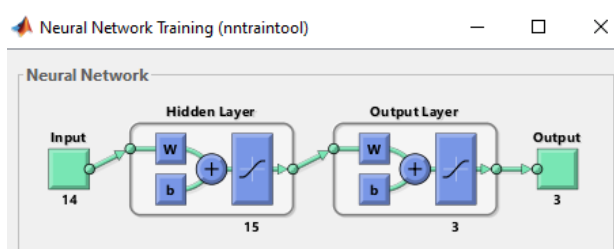


Fig. 2: Structure of feed-forward network

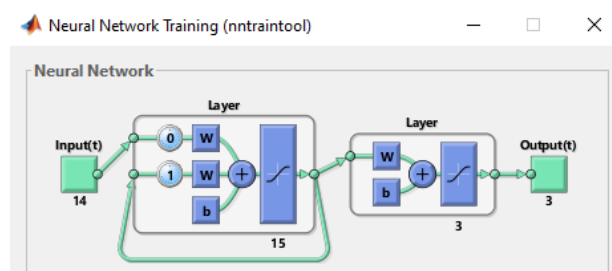


Fig. 3: Structure of layer recurrent network

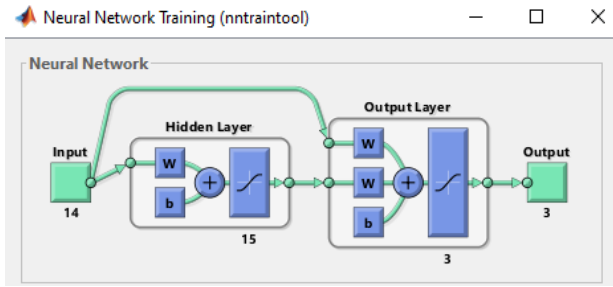


Fig. 4: Structure of cascade network

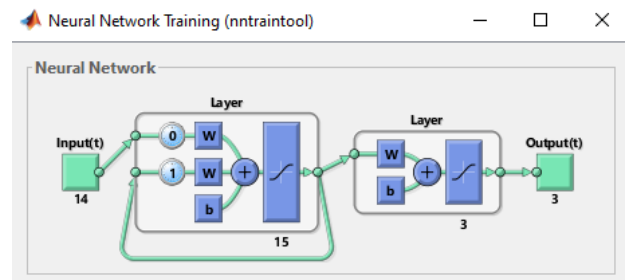


Fig. 5: Structure of Elman back-propagation network

Through the command of “nntraintool” in the Matlab program, we implemented the created ANN models. The data that was used in building the models belong to a group of asphalt sections of the M-4 highway of the Russian road network. The set of training data used in this study included the results of calculating the elastic moduli of the structural layers of non-rigid road pavements, carried out in a specialized software package supplied with an FWD Primax shock loading unit on 555 pavement sections, managed by the State Company Russian Highways. We used four types of artificial neural networks, which were (feed-forward, layer recurrent, cascade, and Elman) back-propagation to get the best results. Several cells were selected in the hidden layer for each type of model to study its effect on the training process. The program divided the data at random with 70 % for the training process, 15 % for verification, and 15 % for the testing process. Figure 6 shows the architecture of the artificial neural network model.

We carried out three steps to obtain the optimal number of neurons and hidden layers in ANN models: we trained the model with different hidden layers (first step), estimated the results of the performance model (second step), and compared the predicted values of the tested data to the target values (third step).

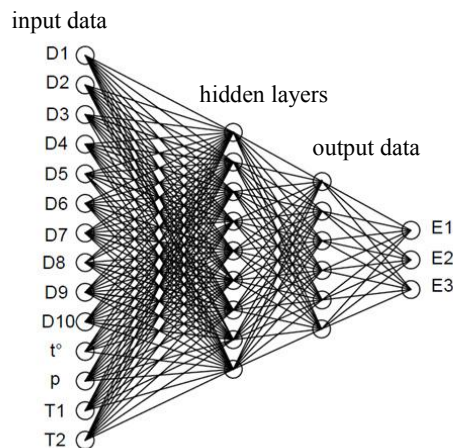


Fig. 6: Neural network architecture to determine the elastic moduli of the structural layers of the flexible pavements

D1, D2, D3 D10 are the results of the measured deflection values under the sensors — geophones; t° is the surface temperature of the pavement; P is the pressure on the pavement; T1 and T2 are the thickness of the layers of asphalt concrete and the thickness of the base layer of the pavement; E1, E2, and E3 – the elastic moduli of asphalt concrete layers, the base, and the subgrade, respectively.

The Models Evaluation.

The correctness of the values of the prediction results for every model is calculated using the mean absolute error (MAE), the multiple determinations coefficient R^2 , the mean root square error (RMSE), and the mean absolute percentage error (MAPE), which are determined from the following formulas (1, 2 and 3):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - E_t| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - E_t)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - E_t}{A_t} \right| * 100 \quad (3)$$

Where A_t is the actual value in period t ; E_t is the expected value in period t ; and n is the number of the total period. With respect to the statistical indices, MAE, RMSE and MAPE, smaller values usually indicate higher accuracy results. In this analysis, the MAE, R^2 , RMSE and MAPE values for every model are obtained through comparing the predicted results against the actual values.

Results. Four types of NNA were developed with four different neuron numbers in the hidden layers to see which one is more suitable to use in the forecasting process. The total number of ANN models generated was sixteen. All models were trained under various conditions, including 10, 15, 17, and 20 neurons in the hidden layers. The values of the following MAE, R^2 , RMSE and MAPE indices for all models were calculated as shown in Table 2 to assess the model performance.

Table 2
Evaluation of the models performance

	prediction E(AS) of feed-forward models				prediction E(AS) of cascade models				prediction E(AS) of Elman models				prediction E(AS) of layer-recurrent models			
	10n	15n	17n	20n	10 n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n
MAE	2.58	3.24	5.61	4.9	41.2	2.48	5.61	31.8	1.46	1.81	1.39	6.45	4.11	7.66	4.85	9.27
R^2	1.00	1.00	1.00	1.0	0.91	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RMSE	3.38	10.3	10.7	11	202	7.78	10.7	149.	2.05	6.48	3.20	26.1	7.15	16.9	10.5	25.7
MARE	0.11	0.15	0.24	.26	1.73	0.12	0.24	1.34	0.08	0.08	0.06	0.27	0.16	0.34	0.22	0.47
	prediction E(base) of feed-forward models				prediction E(base) of cascade models				prediction E(base) of Elman models				prediction E(base) of layer-recurrent models			
	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n
MAE	1.11	0.61	1.39	1.15	0.55	0.77	1.39	1.74	0.89	0.86	1.02	1.65	1.37	1.43	0.87	1.17
R^2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
RMSE	2.10	2.16	3.58	2.8	0.82	2.70	3.58	6.01	2.14	3.51	3.34	6.19	1.80	2.62	1.19	3.24
MARE	0.42	0.19	0.48	0.4	0.23	0.24	0.48	0.52	0.30	0.25	0.33	0.51	0.58	0.55	0.36	0.38
	prediction E(sub-grade) of feed-forward models				prediction E(sub-grade) of cascade models				prediction E(sub-grade) of Elman models				prediction E(sub-grade) of layer-recurrent models			
	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n	10n	15n	17n	20n
MAE	1.82	0.38	1.81	4.5	1.51	2.90	1.81	2.22	3.34	0.92	2.90	4.37	1.74	1.63	1.89	2.12
R^2	0.99	1.00	0.99	0.87	0.99	0.96	0.99	0.95	0.87	0.99	0.93	0.86	0.98	0.99	1.00	0.97
RMSE	4.48	0.73	3.91	13.3	2.81	10.6	3.91	5.85	10.5	2.48	7.19	17.4	4.16	2.78	4.07	4.84
MARE	1.84	0.46	1.94	4.6	1.92	2.32	1.94	2.15	3.22	0.86	2.85	3.85	2.16	2.13	1.96	2.53

The best four models that express the four types of artificial neural networks were selected based on the values of the analytical parameters mentioned in the previous table for the results of the models to compare them and know the extent of their impact. Whereas, the best results were due to the models with two hidden layers and 14-15-3 structure for all developed types. All models took the maximum number of repetitions to complete the training process, which were 1000 repetitions. But they differed in the periods taken for training, as training of the models ended after (54, 157, 67, and 173) seconds for the four models, respectively, as shown in Figures (6–9). Being aware of that, the training process stops if the maximum number of repetitions or the time rate is exceeded.

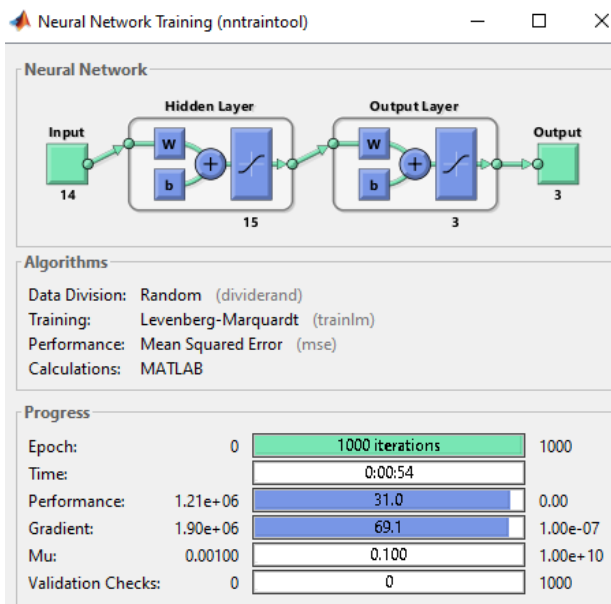


Fig. 6: Training window of feed-forward model

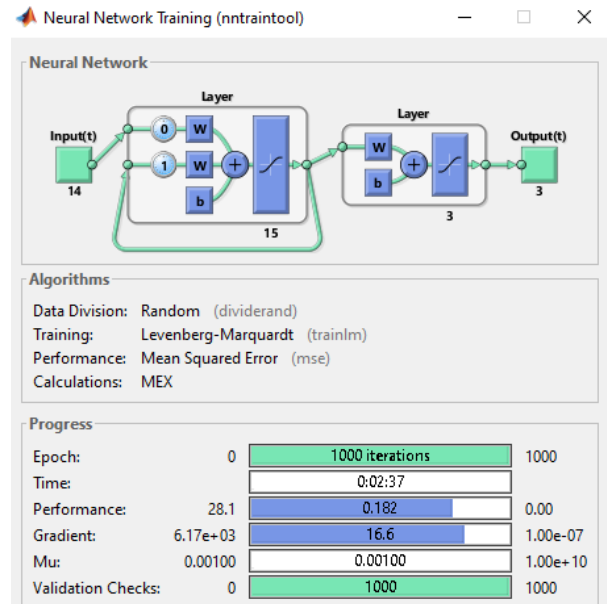


Fig. 7: Training window of layer recurrent model

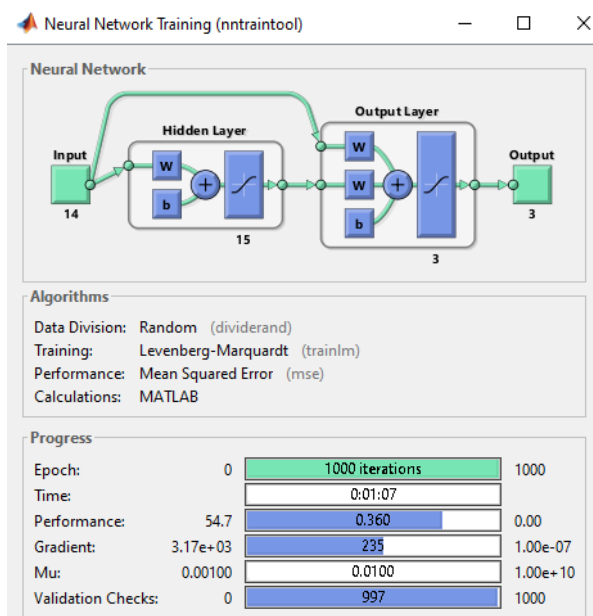


Fig. 8: Training window of cascade model

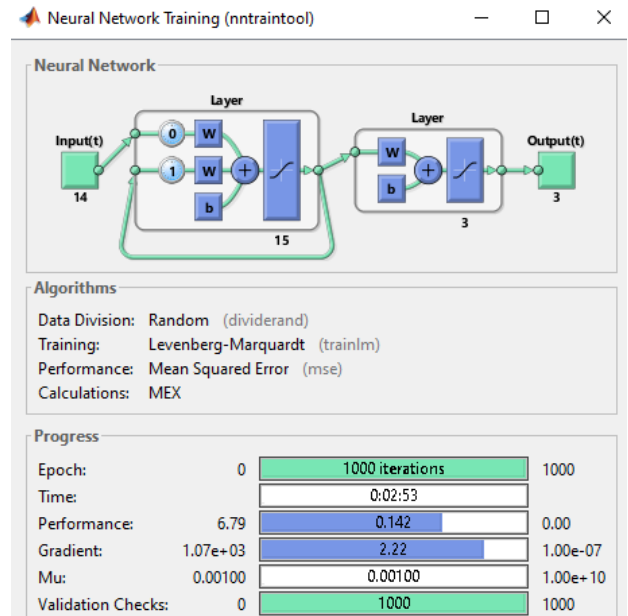


Fig. 9: Training window of Elman backpropagation

The weights and biases of all parameters were modified to decrease the error between target values and network output throughout the training phase. Each neuron weight is adjusted based on its impact on the network result. These weights and biases were evaluated during training as the weights of the inputs to the hidden layer.

Figures (10–13) illustrate the mean squared error values vs the number of iterations for the training process of the compared models, respectively. When using the feed-forward back-propagation model, the best validation performance was 16.68 at epoch 1000. Otherwise, the best validation performance for the layer recurrent, cascade and Elman back-propagation models were (11.52, 119,888 and 28,067) at epoch zero, respectively. In all of the curves, we observe the convergence of the test curves with the validation curves, which revealed that the test and validation curves are very similar.

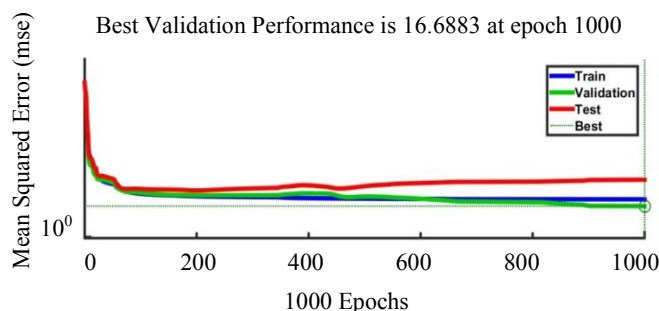


Fig. 10: Performance of feed-forward model

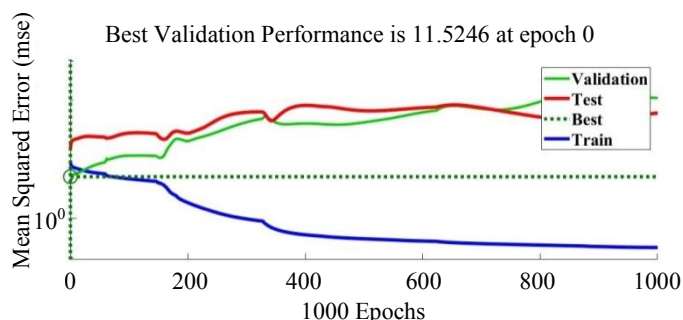


Fig. 11: Performance of layer recurrent model

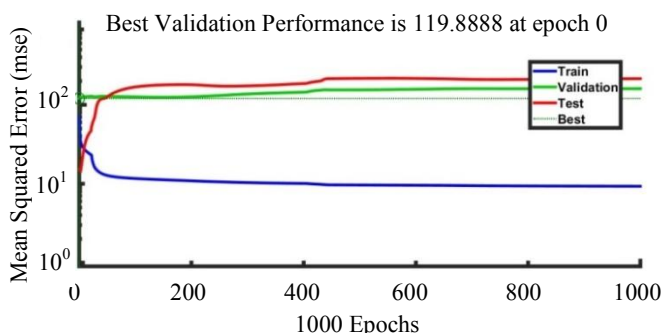


Fig. 12: Performance of cascade model performance

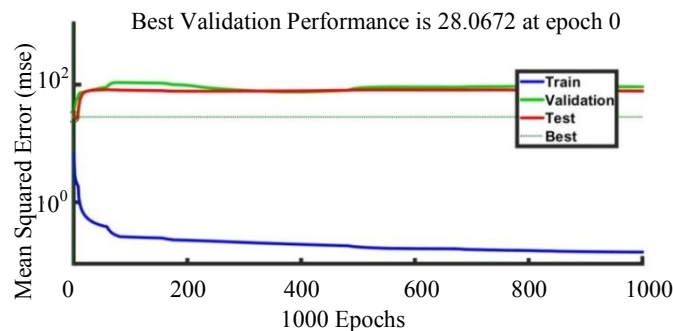


Fig. 13: Performance of Elman model

According to Figures (14 and 15), artificial neural networks are evaluated using a correlation function (R) between network result values against target data in feed-forward and cascading back-propagation models. Looking at the R-value of the models during the training, validation and testing phases, we notice a good agreement between the target values and the network results. Where we find that the slope of the line that represents the relationship between data and results is approximately equal to 1 in all stages of training, and this indicates the robustness of the models and the possibility of using them during the prediction process.

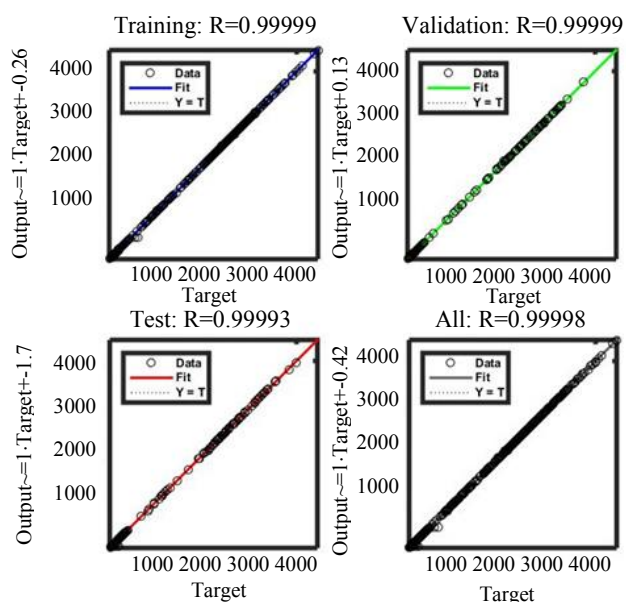


Fig. 14: Feed-forward model regression charts

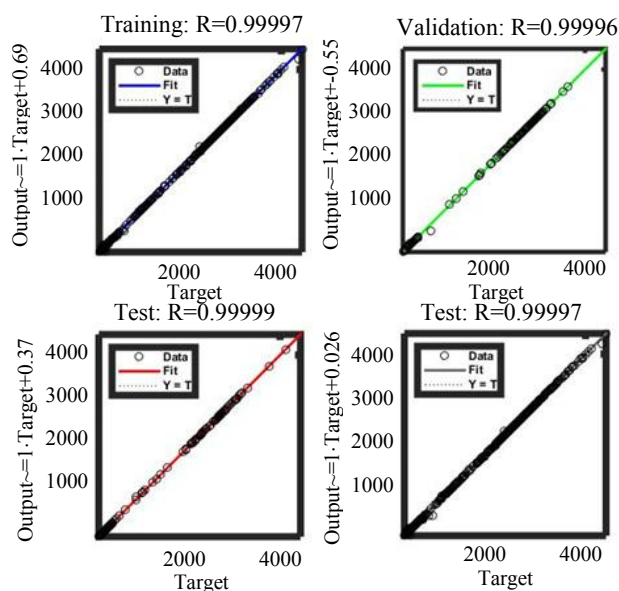


Fig. 15: Cascade backpropagation regression charts

At the beginning of network learning, all learning stages of training, validation, and testing, run in an open loop. Once the training phase is over, the network performance turns into a closed loop during the multi-stages of prediction.

The models that correctly represent the available data are selected during the stages of education, verification, and testing, based on the statistical parameters, as mentioned previously. It was required to determine if the models could forecast the elastic modulus for 25 segments that had not been utilized during model training and compare them to target values, along with knowing how much the network type affected its performance in terms of elastic modulus assessment. Table 3 shows the comparison of the elastic modulus target values for all layers (asphalt concrete, base, and subgrade) of 25 sections and the forecasting results values of the four ANN types (feed-forward, layer recurrent, cascade, and Elman) back-propagation models.

Table 3

The comparison of the predictions of the proposed models

Actual modulus of elasticity, MPa			Predicted values of feed-forward model, Mpa (15n)			Predicted values of layer recurrent model, Mpa (15n)			Predicted values of cascade backprop model, Mpa (15n)			Predicted values of Elman backprop model, Mpa (15n)		
Asphalt	Base	Sub-grade	Asphalt	Base	Sub-grade	Asphalt	Base	Sub-grade	Asphalt	Base	Sub-grade	Asphalt	Base	Sub-grade
1017.0	208.1	63.1	1013.6	209.0	64.5	1024.6	208.0	67.3	1016.7	207.1	63.3	1017.7	209.3	64.5
1559.1	255.2	155.8	1565.1	254.9	157.8	1575.9	250.1	144.6	1565.1	255.8	151.1	1569.1	255.6	166.9
1226.2	200.7	88.9	1226.4	200.3	87.1	1227.7	201.6	88.1	1226.9	200.2	92.6	1222.9	201.0	93.9
2380.9	389.8	139.0	2431.7	400.5	137.2	2305.9	400.3	143.7	2349.2	407.3	149.8	2418.0	403.2	190.7
3309.2	329.5	61.9	3312.3	329.4	61.8	3302.4	332.5	62.4	3310.4	329.6	61.9	3309.9	329.8	62.2
1883.9	187.6	51.1	1881.0	187.1	51.0	1878.3	189.8	48.5	1885.4	187.7	51.4	1883.3	187.9	51.2
2104.6	209.6	45.3	2103.2	209.6	45.9	2099.3	209.3	45.1	2104.4	209.6	44.9	2104.7	210.0	44.9
2763.7	275.2	57.3	2761.9	275.1	57.0	2763.8	274.6	58.1	2763.4	275.3	57.3	2763.8	275.2	57.1
3124.2	311.1	61.2	3124.0	310.9	61.2	3120.2	312.3	60.9	3124.5	311.1	61.2	3124.0	311.2	61.5
2810.1	279.8	58.2	2809.8	279.8	58.2	2810.7	279.9	57.9	2810.0	279.8	58.2	2809.9	279.8	58.2
2733.7	272.2	60.1	2733.6	272.2	60.1	2733.3	271.9	59.1	2733.7	272.2	60.1	2733.7	272.1	60.2
2718.9	270.8	60.5	2718.7	270.5	60.6	2719.9	270.8	59.6	2718.8	270.6	60.5	2718.8	270.5	60.7
3266.2	325.3	73.0	3270.4	325.6	73.1	3254.1	324.4	71.9	3265.4	325.1	72.8	3265.8	325.4	73.1
2430.0	242.0	55.3	2430.4	242.0	55.3	2428.2	242.3	55.8	2429.9	242.1	55.1	2430.1	241.9	55.2
3671.5	365.6	69.3	3668.3	365.7	69.0	3700.0	365.8	70.5	3671.3	365.6	68.9	3666.3	365.0	69.7
2395.2	238.5	58.1	2395.2	238.6	58.0	2394.0	238.3	56.9	2395.1	238.5	58.1	2395.3	238.3	57.9
2328.7	231.9	63.2	2329.0	232.3	63.1	2327.0	232.5	62.8	2328.7	232.4	63.6	2328.2	232.0	63.3
2810.1	279.8	64.8	2809.8	279.8	64.7	2810.8	280.3	64.1	2809.8	279.8	64.7	2810.3	279.8	64.8
2350.5	234.1	60.2	2350.8	234.2	60.1	2346.3	233.2	59.1	2350.6	234.2	60.5	2350.4	234.1	60.3
2406.7	239.7	59.1	2406.8	239.7	59.0	2403.0	238.7	58.1	2406.8	239.7	59.1	2406.8	239.6	59.2
1927.2	191.9	54.8	1927.9	192.1	54.7	1929.3	193.7	56.1	1927.4	191.9	54.8	1927.2	192.1	54.8
1746.5	173.9	56.0	1746.0	173.7	55.8	1745.2	177.2	58.5	1746.5	173.9	56.4	1747.8	173.8	55.9
2149.6	214.1	55.6	2149.3	214.0	55.6	2146.1	213.3	55.7	2149.7	214.1	55.5	2149.6	214.3	55.6
1927.2	191.9	48.3	1927.1	191.8	48.5	1932.6	192.7	50.1	1927.8	191.8	47.8	1926.5	192.3	48.0
2095.8	208.7	50.5	2095.9	208.9	50.4	2095.6	208.6	51.3	2095.9	208.8	50.2	2095.7	209.1	50.2

A high degree of convergence can be shown between the four models when they are compared to each other and to actual data, as shown in Figure 16 (a, b, c). It is also understood from the results that the models can reduce the error during the process of predicting the elastic modulus, where the lowest value of the coefficient of multiple determination was " $R^2 = 0.95$ " for the cascade back-propagation model. However, the best performance in the prediction process, as shown in Table 2, was for the feed-forward model with a 14-15-3 structure, which had the lowest values for the statistical

parameters MAE, RMSE, and MAPE, and the largest value for the coefficient of multiple determination (R^2) for the three pavement layers (asphalt, base, and substrate).

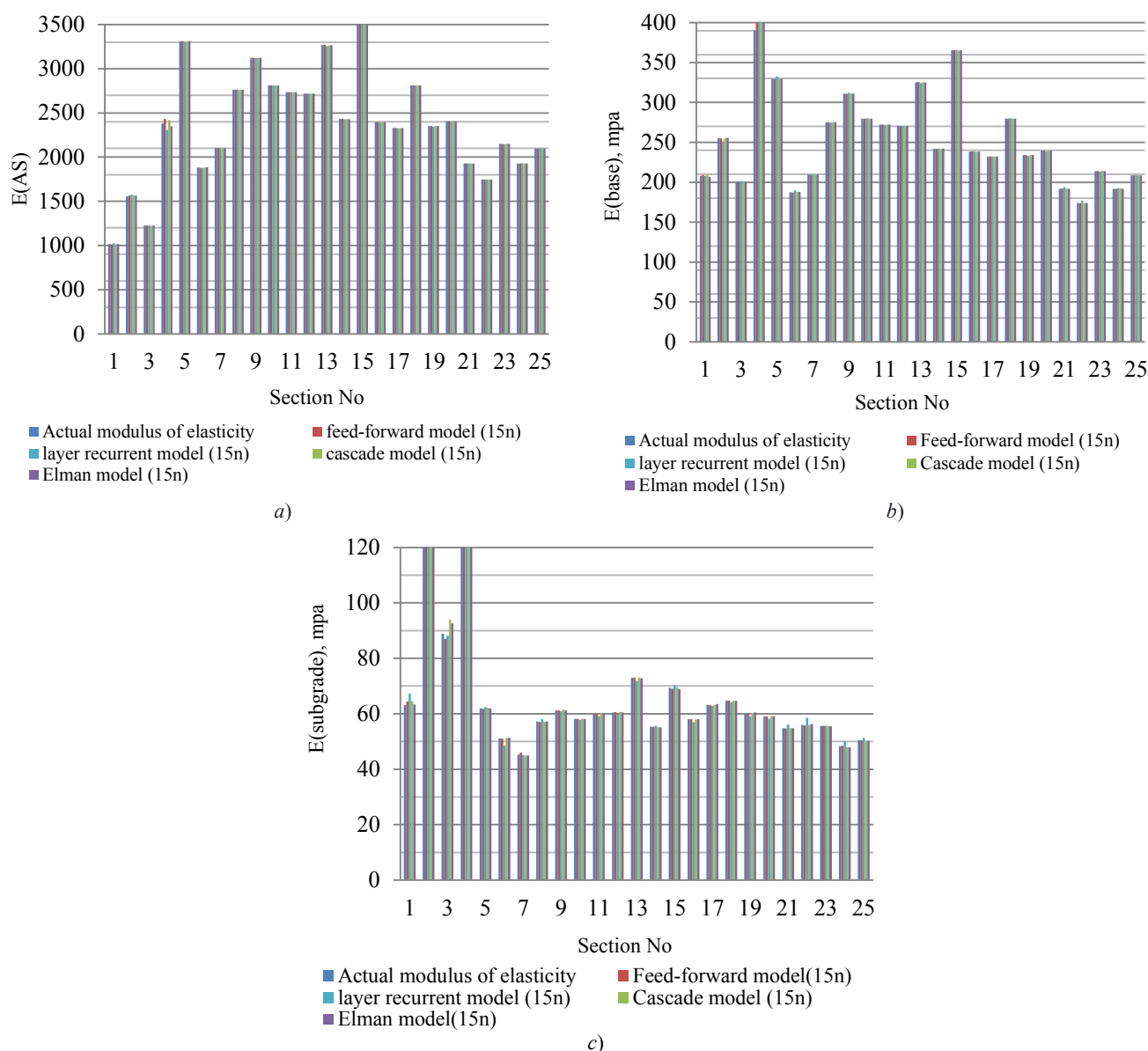


Fig. 16 (a, b, c): Illustration of the comparison between the values of the target elasticity modulus against the expected values of the developed ANN models and each other for all pavement layers

Discussion and Conclusion. The authors constructed sixteen models in the study. Every four models follow four different artificial neural network types (feed-forward, layer recurrent, cascade, and Elman back-propagation) to calculate the elastic modulus of the pavement layers subjected to dynamic load. The FWD test was selected to represent the dynamic load generated by the road traffic and to measure the reaction of the pavement. Matlab software was used to create ANN models utilizing deflection data from the (M4) highway in the Russian Federation Road network.

The differences between the results of the four best models for the four types of used algorithms were very small, as they showed closeness between them and the target values. The best results were for the feed-forward model with 15 neurons in the two-hidden layers to form the structure of the model 14-15-3, which produced the best values for the statistical coefficients.

There is no correlation between an increase or a decrease of neurons in the hidden layers and an improvement in models' performance. Instead, the decision is dependent on trial and error.

From the results, we find the capability of ANN models to predict the elastic modulus of flexible pavement correctly and use it in managing the pavement deteriorations.

Acknowledgments. Researcher Mohamed Mostafa Elshamy is funded by a scholarship under the executive program between the Arab Republic of Egypt and the Russian Federation. They have my thanks and appreciation.

References

1. Rukavina T, Ožbolt M. Pavement management system-data collecting. Gospodarenje prometnom infrastrukturuom. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice; 2009. P. 95–176.
2. Paterson WDO. Road deterioration and maintenance effects: Models for planning and management. Washington, D.C.: World Bank; 1988. 454 p. <http://worldcat.org/isbn/0801835909>
3. Zaniwski JP, Mamlouk MS. Pavement maintenance effectiveness—Preventive maintenance treatments. Participant's Handbook. Report no. FHWA-SA-96-027, Federal Highway Administration, Washington, D.C.; 1996. 204 p. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013734.pdf>
4. Liu GR, Xu Han. Recent progress on computational inverse techniques in non-destructive evaluation. In: Computational Fluid and Solid Mechanics 2003. Elsevier; 2003. P. 418–421. <https://doi.org/10.1016/B978-008044046-0.50103-2>
5. Tutumluer E, Pekcan O, Ghaboussi J. Nondestructive pavement evaluation using finite element analysis based soft computing models. NEXTRANS Center (US); 2009. 93 p.
6. Lukanen EO. Effects of buffers on falling weight deflectometer loadings and deflections (with discussion). Transportation Research Record. 1992;1355:37–51.
7. Schmalzer PN. Long-term pavement performance program manual for falling weight deflectometer measurements. MACTEC Engineering and Consulting, Inc. United States. Federal Highway Administration (FHWA). Turner-Fairbank Highway Research Center; 2006. 79 p. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/779>.
8. Marecos V, et al. Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. Construction and Building Materials. 2017;154:1164–1172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.034>
9. Öcal A. Backcalculation of pavement layer properties using artificial neural network based gravitational search algorithm. Middle East technical university; 2014. 181 p. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12618019/index.pdf>
10. Yang H Huang. Pavement analysis and design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1993. 815 p.
11. Sundin S, Braban-Ledoux C. Artificial intelligence-based decision support technologies in pavement management. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2002;16:143–157 <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00220>
12. Ajbar A, Ali EM. Prediction of municipal water production in touristic Mecca City in Saudi Arabia using neural networks. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2015;27:83–91. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.01.001>
13. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall; 1999. 842p.
14. Saltan M, Terzi S. Backcalculation of pavement layer parameters using artificial neural networks. IJEMS. 2004;11:38–42. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/9259>
15. Ceylan H, Gopalakrishnan K, Bayrak MB. Neural networks based concrete airfield pavement layer moduli backcalculation. Civil Engineering and Environmental Systems. 2008;25:185–199. <https://doi.org/10.1080/10286600701838667>
16. Nazzal MD, Tatari O. Evaluating the use of neural networks and genetic algorithms for prediction of subgrade resilient modulus. International Journal of Pavement Engineering. 2013;14:364–373.
17. Gopalakrishnan K, Khaitan SK. Finite element based adaptive neuro fuzzy inference technique for parameter identification of multilayered transportation structures. Transport. 2010;25:58–65. <https://doi.org/10.3846/transport.2010.08>
18. Gopalakrishnan K. Neural network–swarm intelligence hybrid nonlinear optimization algorithm for pavement moduli back-calculation. Journal of Transportation Engineering. 2010;136:528–536. [10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000128)
19. Kim D, Kim J-M, Mun S-H. Normalisation methods on neural networks for predicting pavement layer moduli. Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice. 2010;19:38–46.
20. Beltrán G, Romo M. Assessing artificial neural network performance in estimating the layer properties of pavements. Ingeniería e Investigación. 2014;34:11–16. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v34n2.42158>
21. Li M, Wang H. Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD

testing with viscoelastic and nonlinear parameters. International Journal of Pavement Engineering. 2019;20:490–498. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1309197>

22. Ferregut C, et al. Artificial neural network-based methodologies for rational assessment of remaining life of existing pavements. University of Texas, El Paso; Texas Department of Transportation; Federal Highway Administration. 1999. 74 p.

23. Ceylan H, et al. Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior. International Journal of Pavement Engineering. 2005;6:171–182.

24. Abu-Lebdeh G, Ahmed K. A Neural Network Approach for Mechanistic Analysis of Jointed Concrete Pavement. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2013. Vol. 9.

25. Ghanizadeh AR, Ahadi MR. Application of artificial neural networks for analysis of flexible pavements under static loading of standard axle. International Journal of Transportation Engineering. 2015;3:31–43. [10.22119/IJTE.2015.13361](https://doi.org/10.22119/IJTE.2015.13361)

26. Khalil AS, Starovoytov SV, Serpukrylov NS. The Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Application for the Ammonium Removal from Aqueous Solution Predicting by Biochar. Materials Science Forum. 2018;931:985–990. [10.4028/www.scientific.net/MSF.931.985](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.985)

27. Elshamy MMM, Tiraturyan AN. Using application of an artificial neural network system to backcalculate pavement elastic modulus. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering. 2020;46:84–93.

Submitted 11.10.2021

Reviewed 29.10.2021

Accepted for publication 08.11.2021

About the Authors:

Mohamed Mostafa Mahmoud Elshamy, PhD student of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), assistant lecturer at the Faculty of Engineering, Al-Azhar University (11884, Arab Republic of Egypt/Egypt, Cairo, Nasr-City), [Scopus](#), [ORCID](#), mm.elshamy85@gmail.com

Tiraturyan, Artem N., associate professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci. (Eng.), associate professor, [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), tiraturjan@list.ru

Uglova, Evgeniya V., associate professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor, [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), uglova.ev@yandex.ru

Claimed contributorship

M. M. M. Elshamy: preparation of the text; preparation of the results and graphs; formulation of conclusions. A. N. Tiraturyan: a review of literature sources; calculations; computational analysis; analysis of the research results. E. V. Uglova: basic concept formulation; formulation of the research purpose and tasks; academic advising; text processing; correction of the conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



UDC 004.42

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-376-383>

Software Module Development for the Parametric Generation of Truss Structure Geometry in a Two-Dimensional Setting

S. G. Glushko¹ , A. A. Lyapin¹ , Yu. Yu. Shatilov¹ , A. V. Cherpakov² ,
R. K. Haldkar^{2,3}

¹Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

²Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

³G H Raisoni College of Engineering (Nagpur, India)

✉ glsege98@gmail.com



Introduction. Truss structures are widespread in construction due to a number of advantages, such as economy, versatility, and scalability. Accordingly, their modeling and calculation are urgent tasks in the design of building structures. Automatic solution to these problems causes an increase in design efficiency, calculation accuracy, and lower costs. The objective of the study is to examine the functionality and operation algorithm of the software module developed by the authors that generates the geometry of two-dimensional truss structures for subsequent modeling.

Materials and Methods. Following the research of the widespread truss configurations, the classification of chords available in the software under consideration is given. The method of parameterizing a truss structure is provided. This method includes base geometric parameters of the structure such as dimensions, model construction rules, and additional features, as well as a comprehensive algorithm. The software is developed in JavaScript.

Results. The software module has been integrated into a web application for calculating two-dimensional rod structures. To illustrate the functionality of the software, the examples of user interface are given as well as an example problem. The example includes configuration and calculation of an inclined truss structure. The results, such as support reactions and internal forces with axial force diagram, are provided.

Discussion and Conclusions. Using this software module within the framework of the tool for calculating rod structures allows for the simplified process of modeling and calculating complex truss structures, design time, and resource reduction. The software module provides tools for specifying various types of structures, applying loads and assigning properties of a rod system, which makes it a useful instrument for design engineers.

Keywords: engineering, design in construction, truss, parameterization, computing system, web development.

For citation: S. G. Glushko, A. A. Lyapin, Yu. Yu. Shatilov, A. V. Cherpakov, R. K. Haldkar. Software Module Development for the Parametric Generation of Truss Structure Geometry in a Two-Dimensional Setting. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 376–383. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-376-383>

Funding information: the research was carried out with the partial support of the Southern Federal University (grant VNGr-07 / 2020-04. IM Ministry of Education).

Glushko S. G., Lyapin A. A., Shatilov Yu. Yu., Cherpakov A. V., Haldkar R. K., 2021



Разработка программного модуля для параметрического построения геометрии ферменной конструкции в двумерной постановке

С. Г. Глушко¹ , А. А. Ляпин¹ , Ю. Ю. Шатилов¹ , А. В. Черпаков² , К. Х. Ракеш^{2,3}

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

³Автономный инженерный колледж при Университете Раштрасанта Тукадоджи Махараджа Нагпура (Индия)

Введение. Ферменные конструкции получили широкое распространение в строительстве благодаря экономичности, универсальности и масштабируемости. В связи с этим их моделирование и расчет являются

актуальными задачами при проектировании строительных конструкций. Автоматизированное решение этих проблем приводит к повышению эффективности проектирования, точности расчетов и снижению затрат. Целью данного исследования являлось изучение функциональных возможностей и алгоритма работы разработанного авторами программного модуля, формирующего геометрию двумерных ферменных конструкций для последующего моделирования.

Материалы и методы. По результатам исследования распространенных конфигураций ферм дана их условная классификация, доступная в рассматриваемой программе. Приведена методика параметризации ферменной конструкции. Эта методика включает в себя базовые геометрические параметры конструкции, такие как размеры, правила построения модели и дополнительные функции, а также комплексный алгоритм. Программное обеспечение разработано на JavaScript.

Результаты исследования. Программный модуль интегрирован в веб-приложение для расчета двумерных стержневых конструкций. Для иллюстрации функциональности программного обеспечения приведены примеры пользовательского интерфейса, а также пример задачи. Пример включает конфигурацию и расчет наклонной ферменной конструкции. Приведены результаты в виде опорных реакций и внутренних сил, построена диаграмма осевых сил.

Обсуждение и заключения. Использование данного программного модуля в составе инструмента для расчета стержневых конструкций позволяет упростить процесс моделирования и расчета сложных ферменных конструкций, сократить время проектирования и сократить ресурсы. Программный модуль предоставляет инструменты для задания различных типов конструкций, приложения нагрузок и задания свойств стержневой системы, что делает его полезным инструментом для инженеров-проектировщиков.

Для цитирования: Разработка программного модуля для параметрического построения геометрии ферменной конструкции в двумерной постановке / С. Г. Глушко, А. А. Ляпин, Ю. Ю. Шатилов [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 376–383. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-376-383>

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке Южного федерального университета (грант ВНГр-07 / 2020-04. ИМ Минобрнауки).

Introduction. Truss structures are used in various building elements. Structural solutions of trusses are distinguished by a great variety, differing in the set of parameters for their use and optimization. In the world practice of using structures, there are more than 100 various systems differing primarily in the design of the rod interface. The basic typical structural element is a bar that has conjugate fastening with other elements at the nodes. These designs require certain approaches to the calculation and assessment of their reliability. In works [1–6], approaches to some calculation and experimental methods for assessing their reliability are highlighted. Some approaches and calculation schemes for assessing the reliability of defective structures as well as solving the problem of restoring the properties of their individual elements are covered in monographs [7–8].

Rod structures are systems consisting of linear rods connected at nodes. By the nature of the connection of elements in the nodes, systems with rigid nodes, hinged joints of all elements, and the combined ones are distinguished. From the geometric point of view, planar and spatial rod systems are distinguished.

Truss structures are a subcategory of rod systems that remain geometrically unchanged if rigid joints in nodes are replaced with hinged ones. The load is applied to truss structures only at the nodes, and only tensile-compressive forces arise in their elements [9, 10].

Truss structures are widespread as elements of buildings and structures. This popularity is due to a number of advantages [11].

Economy — lower material consumption compared to other building structures.

Versatility — the scope of application of trusses is very wide and includes bridges, roof truss systems, cranes, etc.

Scalability — truss length can vary from a few meters to several kilometers.

Due to these characteristics of trusses, their modeling and calculation are urgent tasks in the design of building structures. Automatic solution to these problems causes an increase in design efficiency and calculation accuracy and lower costs [12, 13].

The objective of the study is to examine the functionality and operation algorithm of a software module that generates the geometry of two-dimensional truss structures for subsequent modeling. This program module is a component of the SAPRUS service.

Materials and Methods. Since truss structures are panel structures, i.e., they consist of many sections (panels) identical or similar in geometry, it is possible to parametrically generate a model using the relative coordinates of the

nodes when specifying the section. The parameters for such modeling are the total dimensions of the entire structure (height and span of the truss) and the number of sections used.

The functionality of the software module under consideration provides for the modeling of truss structures of 6 types of chords and their subtypes, depending on the lattice used (Figure 1).

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Fig. 1. Structural diagrams used in the module

Classification of the types of trusses used is the following [14, 15]:

1. rectangular with parallel chords;
2. trapezoidal;
3. triangular;
4. inclined with parallel chords;
5. inclined from both sides (arrow type);
6. polygonal.

Classification of the types of lattices used is the following:

- A. triangular;
- B. triangular with uprights;
- C. triangular with suspensions;
- D. upward diagonal brace;
- E. downward diagonal brace;
- F. with sub-trusses [16].

JavaScript was used as a programming language for the development of the module. In this regard, the module provides ample opportunities for the implementation of cloud computing of building structures in the web-based interface [17].

The software module is based on the object model, which is an array of objects describing each of the six types of structures. Length l and height h are used as parameters for all types of structures. For truss types 2, 4, 5, the height difference dh is required. For each type of structure, an array of objects describing the geometry of its subtypes is given; it includes the position of nodes and bars, rules for constructing sections (parity, mirroring of structural halves, and usage of separators).

The algorithm of the software module generates, according to the specified parameters, an array of absolute coordinates of nodes of all truss rods. This data is sufficient to describe the model geometry. For a full-fledged definition of a structure model within the module, the following additional features are provided:

- supports;
- hinges;
- offset of the left node relative to the origin of coordinates on the scheme;

- loads on the upper structural nodes;
- element grouping for the convenience of subsequent processing.

The module operation algorithm is the following:

1. Calculation of nodal coordinates for the outer vertical bars of the structure if they exist for the selected structure type.
2. Calculation of the width of individual sections and the coordinates of the nodes of the central support bar of truss type 5.
3. Sequential calculation of nodal coordinates of each section and the formation of rod array.
4. Calculation of the coordinates of nodes for additional vertical bars between sections, if necessary, for the selected subtype of the structure.
5. Preliminary visualization of the structure diagram inside the module.
6. Assignment of the additional properties.
7. Data transfer for design and calculation.

After the data has been transferred, the array has to be further processed to add generated elements to the existing collections. Depending on the specific requirements of the wrapper application, this process can be vastly different. The flowchart of the algorithm used in SAPRUS service is shown in Figure 2.

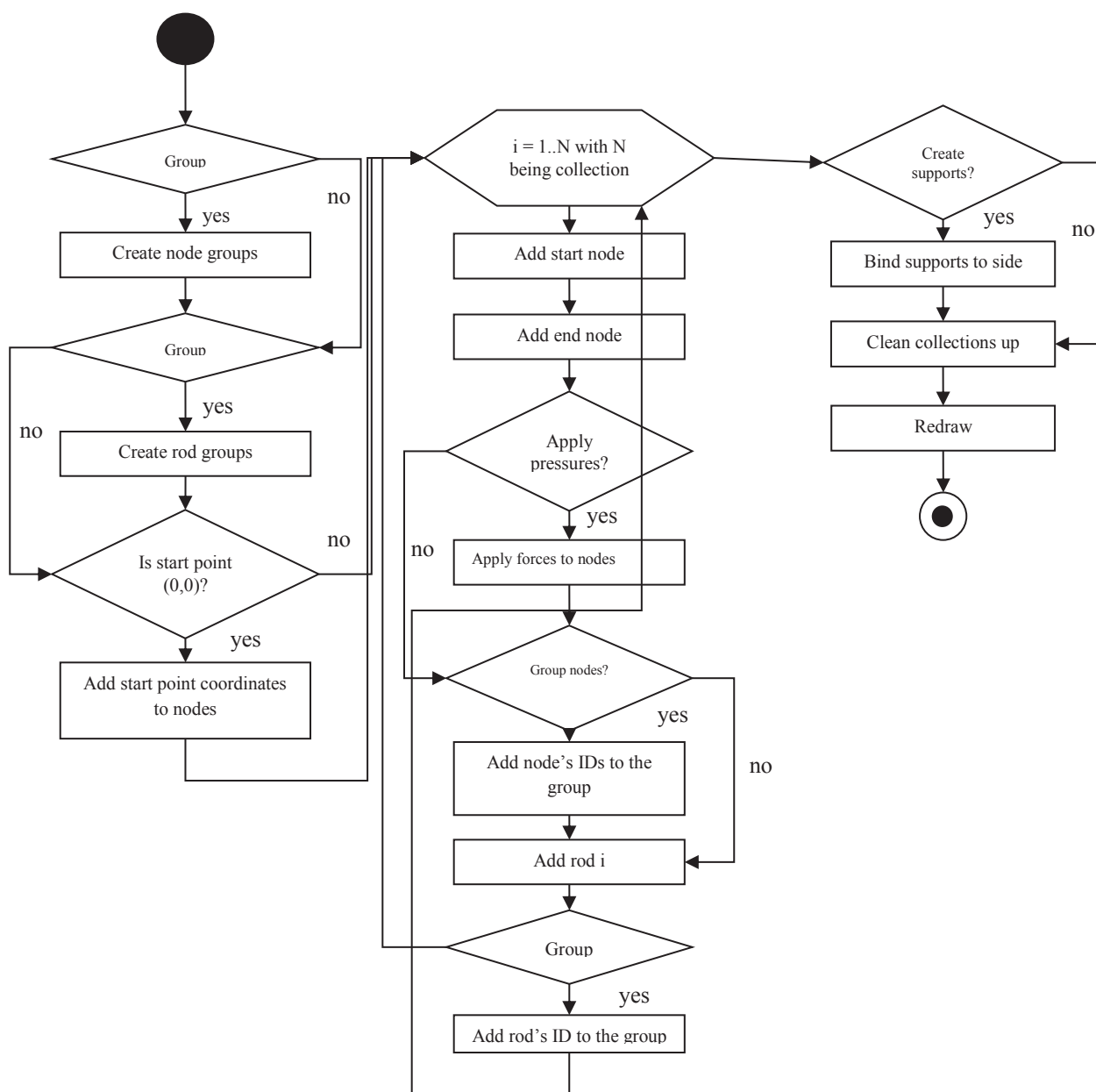


Fig. 2. Post-processing flowchart

As a result, 2 collections are created: *CollectionNodes* and *CollectionRods*. The data stored in these collections is suitable for further manipulation and calculations.

Results. When the module is integrated into a web application for calculating two-dimensional rod structures, the choice of the type and subtype of the scheme occurs in the graphical user interface. To enter truss dimensions as well as additional parameters, fields and switches are used. If the type of truss and parameters are changed, the preliminary design scheme is rebuilt automatically.

To illustrate the role of the module within the framework of a web application, we will demonstrate the design and calculation of an inclined structure 20 m long, 10 m high with 3 m offset and consisting of 5 sections (panels). In the nodes of the upper chord of this structure, concentrated forces of 5 kN are applied vertically, for the left and right-most nodes, this force is reduced by 50 % automatically with the Point Load Factor option. The module interface and the result structure diagram are shown in Figure 3. The structure is calculated with the finite element method [18, 19]. The resulting diagram of axial forces is shown in Figure 4.

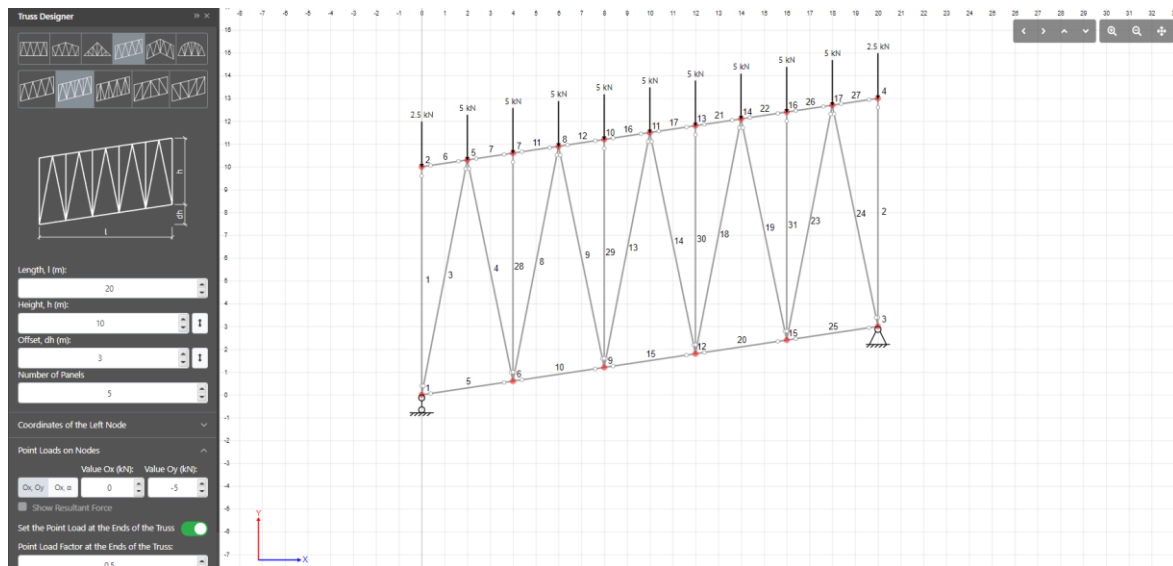


Fig. 3. Configuration window and visualization of the structure diagram

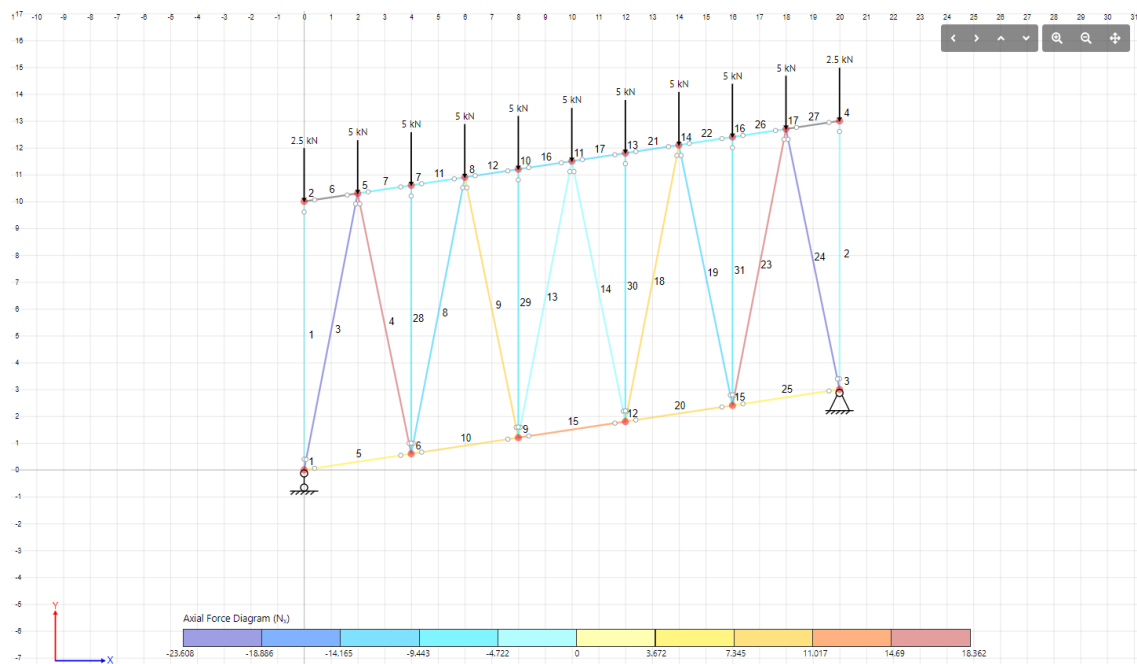


Fig. 4. Axial force diagram

The values of support reactions and internal forces of the calculated structure are presented in Tables 1 and 2, respectively. In Table 1, R is the vertical component of the support reaction, H is the horizontal component of the support reaction, M is the bending moment.

Table 1

Support reactions

Node #	Support type	Values
1	Pinned hinged support	$R_1 = 25$ (kN), $H_1 = 0$ (kN), $M_1 = 0$ (kN·m)
18	Fixed hinged support	$R_3 = 25$ (kN), $H_3 = 0$ (kN), $M_3 = 0$ (kN·m)

Table 2

Internal forces

Rod #	$ Q, \max $ (kN)	$ N, \max $ (kN)	$ M, \max $ (kN·m)
1	0	2.5	0
2	0	2.5	0
3	0	23.608	0
4	0	17.332	0
5	0	4.55	0
6	0	0	0
7	0	8.089	0
8	0	13.115	0
9	0	7.428	0
10	0	10.617	0
11	0	8.089	0
12	0	12.134	0
13	0	2.623	0
14	0	2.476	0
15	0	12.64	0
16	0	12.134	0
17	0	12.134	0
18	0	7.869	0
19	0	12.38	0
20	0	10.617	0
21	0	12.134	0
22	0	8.089	0
23	0	18.362	0
24	0	22.284	0
25	0	4.55	0
26	0	8.089	0
27	0	0	0
28	0	5	0
29	0	5	0
30	0	5	0
31	0	5	0

Discussion and Conclusions. Using this software module within the framework of the tool for calculating rod structures allows for the simplified process of modeling and calculating complex truss structures, design time, and resource reduction. The software module provides tools for specifying various types of structures, applying loads and assigning properties of a rod system, which makes it a useful instrument for design engineers.

References

1. Berger M, Tusnin A. Stress redistribution in flat damaged trusses. E3S Web of Conferences. 2019;97:04033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704033>
2. Rojíček J, Paška Z, Fusek M, et al. Optimization of a Truss Structure Used to Design of the Manipulator Arm from a Set of Components. Applied Sciences. 2021;11:10193. <https://doi.org/10.3390/app112110193>
3. Shatilov YY, Lyapin AA. Vibration-based damage detection techniques for health monitoring of construction of a multi-storey building. Materials Science Forum. 2018;931:178–183. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.178>
4. Lyapin A, Shatilov Yu. Assessment of building structure using data from dynamic monitoring. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052031>
5. Soloviev AN, Parinov IA, Cherpakov AV, et al. Experimental vibration diagnostics of the floor plate set of building construction. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. P. 255–260. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_35
6. Soloviev AN, Parinov IA, Cherpakov AV, et al. Analysis of oscillation forms at defect identification in node of truss based on finite element modeling. Materials Physics and Mechanics. 2018;37:192–197. https://doi.org/10.18720/MPM.3722018_12
7. Lyapin AA, Parinov IA, Buravchuk NI, et al. Improving road pavement characteristics. Applications of industrial waste and finite element modelling. Springer Cham; 2021. 236 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1>
8. Shevtsov SN, Soloviev AN, Parinov IA, et al. Piezoelectric actuators and generators for energy harvesting: Research and Development. Springer Cham; 2018. 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75629-5>
9. Smirnov VA, Gorodetsky AS. Tekhnicheskaya mekhanika. Moscow: Yurait; 2013. 423 p. (In Russ.)
10. Bakošová A, Krmela J, Handrik M. Computing of truss structure using MATLAB. Manufacturing Technology. 2020;20:279–285. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.059>
11. Kopytov MM, Plyaskin AS. Prostranstvennye sterzhnevye konstrukcii pokrytij. Tomsk: TSUAB; 2019. 104 p. (In Russ.)
12. Vasilkin A. Mathematical and computer modeling in the design of steel rod structures. Journal of Physics: Conference Series. 2019;1425:012172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012172>
13. Fedorov SS. Principles of creation of models and technologies of high-quality designing of construction objects. Building and Reconstruction. 2018;80:94–101. (In Russ.)
14. Faibishenko VK. Metallicheskie konstruksii. Moscow: Stroiizdat; 1984. 336. (In Russ.)
15. Kirsanov MN. The choice of a lattice for the frame farm. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. — 2017, 3: — P. 23–27. (In Russ.)
16. Kirsanov MN, Gavrilenko AB. Analytical evaluation of stiffness of the truss. Building and reconstruction. 2018;76:12–17. (In Russ.)
17. David Flanagan. JavaScript: The Definitive Guide, 7th ed. O'Reilly Media; 2020. 706 p.
18. Klaus-Jurgen Bathe. Finite Element Procedures, 2nd ed. Watertown, MA: K.J. Bathe; 2014. 1035 p.
19. Seshu P. Textbook of Finite Element Analysis, 10th edition. New Delhi: PHI Learning Private Limited; 2012. 330 p.

Submitted 01.11.2021

Reviewed 18.11.2021

Accepted for publication 30.11.2021

About the Authors:

Glushko, Sergey G., postgraduate student of the Information Systems in Construction Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-9151), glsege98@gmail.com

Lyapin, Alexander A., professor of the Information Systems in Construction Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor, [Scopus](https://scopus.com/authors/details/lyapin.alexander.a), [Researcher](https://orcid.org/0000-0001-9151-9151), [ORCID](mailto:lyapin.rnd@yandex.ru), lyapin.rnd@yandex.ru

Shatilov, Yuri Yu., associate professor of the Information Systems in Construction Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor, [Scopus](#), [Researcher](#), art-web@mail.ru

Cherpakov, Alexander V., Senior Research Scholar, Vorovich Research Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (8a, Milchakova St., Rostov-on-Don, 344090, RF), Cand.Sci. (Eng.), [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), alex837@yandex.ru

Haldkar Rakesh K., Leading Researcher, Vorovich Research Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (8a, Milchakova St., Rostov-on-Don, 344090, RF), G H Raison College of Engineering, Nagpur, India (Eng.), [Scopus](#), [Researcher](#), [ORCID](#), rakeshhaldkar@gmail.com

Claimed contributorshi:

S. G. Glushko: modeling and development; text preparation; formulation of conclusions. A. A. Lyapin: academic advising; research objectives and tasks setting; the text revision. Yu. Yu. Shatilov: concept formulation; research objectives and tasks setting. A. V. Cherpakov: text preparation; formulation of conclusions; search for scientific literature. R. K. Haldkar: text preparation; formulation of conclusions; search for scientific literature.

All authors have read and approved the final manuscript.