

УДК 519.6

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.032](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.032)

Функциональное наполнение и структура комплекса программ для моделирования температуры горячекатанной полосы с интервальными параметрами

М.Р. Дабас✉, П.В. Сараев

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается структура и функциональное наполнение комплекса программ для моделирования температурного режима в полосе и рабочих валках при горячей прокатке стали. Для моделирования температуры разработано программное обеспечение с вещественными входными параметрами и интервальными входными параметрами. В данной статье рассматривается программное обеспечение с интервальными входными параметрами, его наполнение и конструкция. В статье приведена структура программного обеспечения для моделирования температуры в интервальных значениях, приведены уравнения теплопроводности для решения задач моделирования температур в очаге деформации, на межклетевом промежутке и промежуточном рольганге с интервальными входными параметрами. Рассмотрена схема алгоритма моделирования температуры с учетом конфигураций систем охлаждения на стане горячей прокатки, отдельно приведен алгоритм нахождения коэффициентов трения с учетом интервальных входных параметров. Описаны основные функции реализованной библиотеки классической интервальной арифметики с указанием математического описания. Приведено описание интерфейса для программного обеспечения моделирования температуры полосы с интервальными входными параметрами и некоторых функций. Представлены группы входных параметров программного обеспечения с описанием возможных значений и их единиц измерений.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, структура программного обеспечения, интервальная арифметика, горячая прокатка, энергосиловые расчеты.

Для цитирования: Дабас М.Р., Сараев П.В. Функциональное наполнение и структура комплекса программ для моделирования температуры горячекатанной полосы с интервальными параметрами. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1490> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.032

Functional content and structure of a software package for modeling the temperature of a hot-rolled strip with interval parameters

M.D. Dabas✉, P.V. Saraev

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation

Abstract. The article considers the structure and functional content of a software package for modeling the temperature regime in the strip and working rolls during hot rolling of steel. Software with real input parameters and interval input parameters has been developed for modeling of temperature. This article discusses software with interval input parameters, its content and design. The article presents the structure of software for modeling temperature in interval values, thermal conductivity equations for solving problems of modeling temperatures in the deformation zone, on the interstand gap and intermediate roller with interval input parameters. The scheme of the temperature modeling algorithm is considered, taking into account the configurations of cooling systems at a hot rolling mill, and an algorithm for finding friction coefficients taking into account interval input parameters is separately

presented. The main functions of the implemented library of classical interval arithmetic are described with an indication of the mathematical description. The description of the interface for software modeling the temperature of the strip with interval input parameters and some functions is given. Groups of software input parameters are presented with a description of possible values and their units of measurement.

Keywords: equation of thermal conductivity, software structure, interval arithmetic, hot rolling, energy-power calculations.

For citation: Dabas M.R, Saraev P.V Functional content and structure of a software package for modeling the temperature of a hot-rolled strip with interval parameters. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1490> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.032 (In Russ.).

Введение

Неточность входных параметров в моделировании какого-либо процесса может привести к неправильным результатам или некорректной их интерпретации. Зачастую моделируется реальный процесс, в котором дают погрешность датчики, окружающая среда или другие внешние воздействия, из-за которых сложно установить точный параметр. При моделировании температуры в стали при ее прокате особенно важно следить за точностью входных данных модели, но это не всегда возможно. Целью исследования была разработка математических моделей температурных режимов стальной полосы с интервальными входными параметрами и комплекса программ, разработанного на основе таких математических моделей для учета неопределенности параметров. В данной статье рассматривается структура программного обеспечения, предназначенного для моделирования горячей прокатки стали [1], а точнее чистовой группы клеток, где происходит сама раскатка стали, с учетом входных интервальных параметров. Преимущество разработанного программного обеспечения в том, что оно позволяет учесть множество входных теплофизических и технологических параметров, в том числе с учетом неопределенности их значений, позволяет их гибко настроить, моделирует температуру по длине и толщине стальной полосы на всей чистовой группе клеток в интервальных значениях.

Материалы и методы

Для моделирования теплового режима в полосе доработано программное обеспечение в вещественных числах [2, 3]. Схематичное представление программного обеспечения представлено на Рисунке 1. Запуск программы осуществляется в блоке «Инициализация и запуск расчетов». Для моделирования исследуемая часть стана разбита на три части: промежуточный рольганг, i -ый очаг деформации и i -ый межклетевой промежуток.

Моделирование температуры на промежуточном рольганге и в межклетевых промежутках осуществляется с помощью уравнения (1):

$$\frac{\partial v}{\partial t} - a_s \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0, y \in \left[0, \frac{d}{2}\right], t \in [0, t_{max}]. \quad (1)$$

Моделирование температуры в очаге деформации осуществляется с помощью системы уравнений теплопроводности [4] с начальными и краевыми условиями с учетом технологических параметров участков и теплофизических параметров материалов:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - a_{wr} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = 0, r \in [0, R_{def}], \varphi \in [0, \varphi_{max}], \\ \frac{\partial w}{\partial \varphi} - a_{sc} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = 0, r \in [R_{def}, R_{def} + \delta_{sc}], \varphi \in [0, \varphi_{max}], \\ \frac{\partial v}{\partial \varphi} - a_s \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = 0, r \in [R_{def} + \delta_{sc}, r(\varphi)_{max}], \varphi \in [0, \varphi_{max}]. \end{cases} \quad (2)$$

где u, v, w – температуры валка, полосы и окалины в интервальных значениях соответственно, R_{def} – скорректированный радиус в очаге деформации, a_{wr}, a_{sc}, a_s – коэффициенты температуропроводности валка, полосы и окалины соответственно, δ_{sc} – толщина окалины. Здесь и далее жирным шрифтом выделены интервальные параметры.

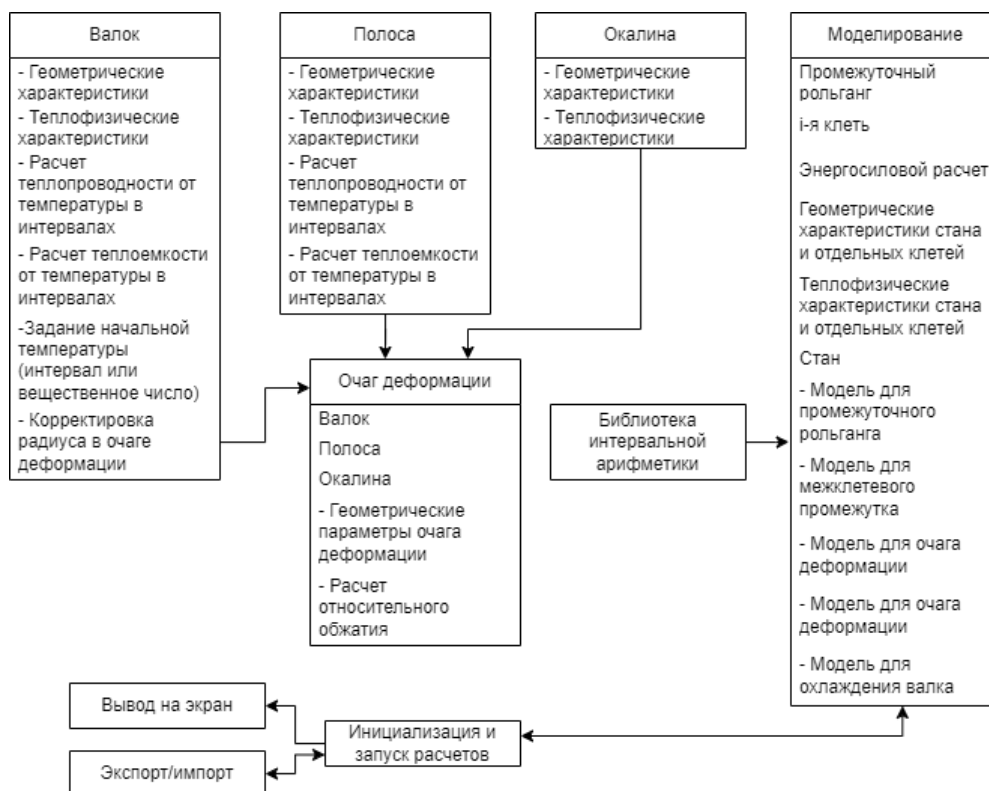


Рисунок 1 – Структура программного обеспечения
Figure 1 – Structure of the software

В блоке «Моделирование» заложены указанные выше математические модели и необходимые характеристики. Схематично процессы в блоке «Моделирование» можно представить так, как на Рисунке 2.

Данные модели в вещественных и интервальных параметрах подробнее представлены в работах [5-7].

Отдельно можно указать расчет энергосиловых параметров (Рисунок 3), где F_{calc} – расчетное усилие проката, а F_{fact} – фактическое усилие проката, e – заданная константа.



Рисунок 2 – Алгоритм моделирования температуры в клет
Figure 2 – Algorithm for modeling the temperature in the stand

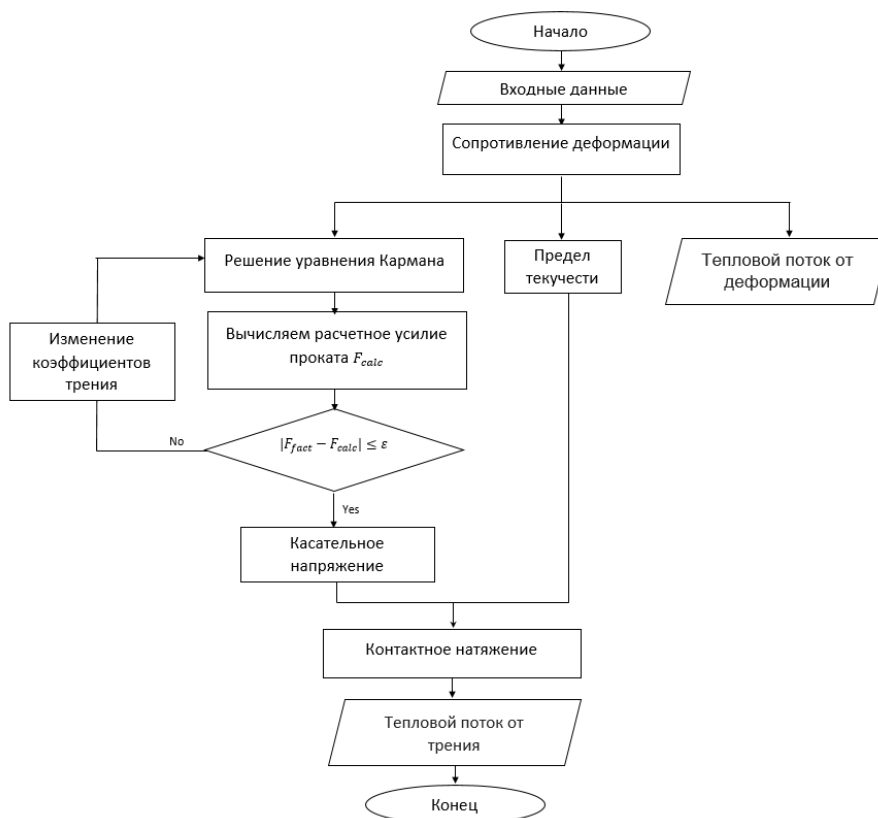


Рисунок 3 – Алгоритм расчета энергосиловых параметров
Figure 3 – Algorithm for calculating energy-power parameters

Основные функции реализованной библиотеки классической интервальной арифметики представлены в Таблице 1 [8]. Сравнение интервалов реализовано как в работе [9].

Таблица 1 – Основные функции интервальной библиотеки
Table 1 – Main functions of the interval library

Название функции	Математическое описание
Инициализация интервального числа	$\{x \in \mathbb{R} x \in [\underline{x}; \bar{x}], \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$
Приравнивание значения	$\{x = y \underline{x} = \underline{y}, \bar{x} = \bar{y}\}$
Сложение двух интервальных чисел	$x + y = [\underline{x} + \underline{y}; \bar{x} + \bar{y}]$
Сложение интервального числа с вещественным	$x + y = [\underline{x} + y; \bar{x} + y]$
Вычитание двух интервальных чисел	$x - y = [\underline{x} - \bar{y}; \bar{x} - \underline{y}]$
Вычитание из интервального числа вещественного числа	$x - y = [\underline{x} - y; \bar{x} - y]$
Умножение двух интервальных чисел	$x \cdot y = [\min(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}); \max(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y})]$
Умножение вещественного числа на интервальное число	$x \cdot y = [\min(x\underline{y}, x\bar{y}, x\underline{y}, x\bar{y}); \max(x\underline{y}, x\bar{y}, x\underline{y}, x\bar{y})]$
Деление двух интервальных чисел	$\frac{x}{y} = x \cdot \left[\frac{1}{\bar{y}}; \frac{1}{\underline{y}} \right], y \notin 0$
Деление вещественного числа на интервального число	$\frac{x}{y} = x \cdot \left[\frac{1}{\bar{y}}; \frac{1}{\underline{y}} \right], y \notin 0$
Деление интервального числа на вещественное число	$\frac{x}{y} = \left[\frac{\underline{x}}{y}; \frac{\bar{x}}{y} \right]$
Вычисление медианы интервального числа	$mean(x) = \left\{ \frac{x + \bar{x}}{2} \right\}$

Результаты

Рассмотрим реализацию программного обеспечения со стороны пользователя. Для моделей (1)-(2) были выведены численные формулы [10]. Интерфейс главного окна представлен на Рисунке 4. Слева задаются входные параметры, которые могут быть введены вручную или загружены с помощью XLSX или JSON форматов. Справа отображаются табличные результаты расчетов для промежуточного роляганга, каждого очага деформации и каждого межклетевого промежутка. Предусмотрено сохранение параметров в JSON формате, а также сохранение табличных значений в XLSX формат.

Входные параметры (слева на Рисунке 4) выделены разными цветами, зеленым цветом выделены параметры, которые касаются непосредственно стана и проката, голубым цветом – дополнительные параметры, которые не зависят от конкретного проката, без выделения цвета – технические параметры. Подробное описание параметров представлено в Таблице 2. При нажатии на кнопку «Рассчитать температуру» при условии введенных входных данных будет запущен расчет и показан

результат. Результат в табличном виде отражает температуру в каждой точке по толщине полосы от поверхности до середины с одинаковым шагом в интервальном значении.

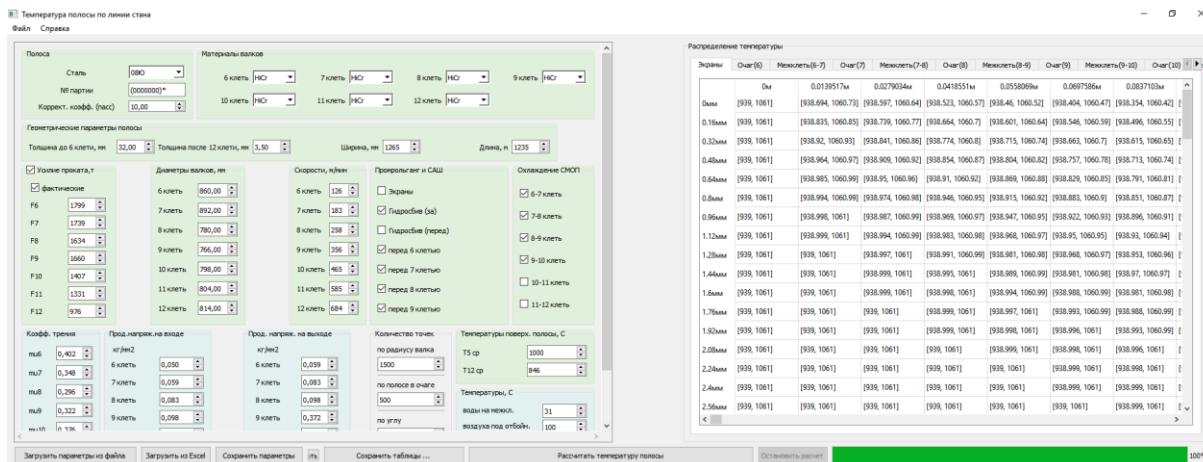


Рисунок 4 – Главное окно программного обеспечения
Figure 4 – Main window of the software

Таблица 2 – Входные параметры
Table 2 – Input parameters

Входная переменная	Описание входной переменной
Материал полосы	Значение берется из списка с загрузкой теплофизических параметров
Материал i-го валька	Значение берется из списка с загрузкой теплофизических параметров
Начальная температура полосы	Задается начальная температура полосы на входе в промежуточный рольганг в интервальном значении
Начальная температура валька	Задается начальная температура валька
Скорости клеток	Задаются скорости каждой клетки (валька), м/мин
Геометрические параметры	Задается ширина и длина полосы, толщина на входе в чистовую группу клеток и на выходе из нее, мм
Диаметры валков	Задаются диаметры всех валков, мм
Признаки включения охлаждения	Задается признак включения охлаждения в конце клетки или в середине клетки, а также на промежуточном рольганге, чекбокс
Усилия проката	Задаются фактические усилия проката для подбора коэффициентов трения
Коэффициенты трения	Задаются начальные коэффициенты трения, которые потом будут пересчитываться по усилию прокатки
Продольные напряжения на входе/выходе	Задаются для каждой клетки

Таблица 2 (продолжение)
Table 2 (continued)

Количество точек	Количество точек в полосе, валке, очаге деформации, на которое мы разбиваемся сетку
Входная переменная	Описание входной переменной
Выходная температура полосы	Задается температура на выходе из 12 клетки
Другие температуры	Задаются температуры воды на межклетевом промежутке, крыши, окружающей среды. Возможна инициализация в интервальном значении

Заключение

В данной статье рассмотрено программное обеспечение для моделирования температурного режима в полосе и валках при горячей прокатке с учетом интервальных параметров. Приведены схемы работы различных частей программного обеспечения, интерфейс программного обеспечения, показаны результаты. Описанное программное обеспечение позволяет смоделировать температуру по толщине и длине стальной полосы, проходящей через процесс пластической деформации в чистовой группе клеток стана горячей прокатки с учетом неопределенности входных значений. Программное обеспечение имеет широкий список входных теплофизических и технологических параметров, настраиваемых пользователем, что позволяет гибко настроить процесс. Математические модели, лежащие в основе описанного программного обеспечения, были апробированы на реальных данных, что позволяет использовать их и программу для моделирования температурных режимов в чистовой группе клеток стана горячей прокатки на практике с учетом особенностей конкретных прокатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грудев А. П., Машкин Л. Ф., Ханин М. И. *Технология прокатного производства: Учебник для вузов*. М.: Металлургия; 1994. 656 с.
2. Dabas M., Saraev P. Modeling of temperature strip with interval parameters in interstand gap in hot rolling. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2021;3;749–751.
3. Oreshina M, Pimenov P., Dabas M. Interactive training model of the thermal mode for a hot rolling mill. *2021 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE*. 2021;3;333–335.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. М.: Главиздат; 1953. 660 с.
5. Дабас М.Р., Зубкова Н.С., Кобзев А.А. Адаптация математической модели теплового режима полосы в чистовой группе клеток стана горячей прокатки. *XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами»*. 2021;515–521.
6. Дабас М.Р. Математическое моделирование теплового режима полосы на межклетевом промежутке при горячей прокатке. *Сборник материалов Шестнадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов*. 2019;258–260.
7. Пименов В.А., Погодаев А.К., Ковалев Д.А. Влияние тепловых режимов горячей прокатки на образование дефектов поверхности холоднокатаного листа. *Производство проката*. 2018;12;8–14.

8. Шарый С.П. *Конечномерный интервальный анализ*. Новосибирск: XYZ; 2021. 650 с.
9. Левин В.И. Сравнение интервалов и оптимизационные задачи с интервальными параметрами. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2002;7(1);57–62.
10. Вержбицкий В.М. *Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения*. М.: Изд-во «Высшая школа»; 2001. 382 с.

REFERENCES

1. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: Uchebnik dlya vuzov*. Moscow, Metallurgiya; 1994. 656 p.
2. Dabas M., Saraev P. Modeling of temperature strip with interval parameters in interstand gap in hot rolling. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2021;3;749–751.
3. Oreshina M., Pimenov P., Dabas M. Interactive training model of the thermal mode for a hot rolling mill. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2021;3;333–335.
4. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki*. Moscow, Glavizdat; 1953. 660 p.
5. Dabas M.R., Zubkova N.S., Kobzev A.A. Adaptacija matematicheskoy modeli teplovogo rezhima polosity v chistovoj grupe kletej stana gorjachej prokatki. *XVII Vserossijskaja shkola-konferencija molodyh uchenyh «Upravlenie bol'shimi sistemami»*. 2021;515–521.
6. Dabas M.R. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo rezhima polosity na mezhkletevom promezhutke pri gorjachej prokatke. *Sbornik materialov Shestnadcatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov i aspirantov*. 2019;258–260.
7. Pimenov V.A., Pogodaev A.K., Kovalev D.A. Vlijanie teplovyh rezhimov gorjachej prokatki na obrazovanie defektov poverhnosti holodnokatanogo lista. *Proizvodstvo prokata = Rolled Products Manufacturing*. 2018;12;8–14.
8. Sharyj S.P. *Konechnomernyj interval'nyj analiz*. Novosibirsk, XYZ; 2021. 650 p.
9. Levin V.I. Sravnenie intervalov i optimizacionnye zadachi s interval'nymi parametrami. *Radioelektronika, informatika, upravlenie. = Radio Electronic Computer Science Control*. 2002;1(7);57– 62.
10. Verzhbickij V.M. *Chislennye metody. Matematicheskij analiz i obyknovennye differencial'nye uravnenija*. Moscow, Vysshaja shkola; 2001. 382 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дабас Моника Раджешевна, аспирант,
Липецкий государственный технический
университет, Липецк, Российская Федерация.
e-mail: monique.dabas@gmail.com
ORCID: [0009-0000-1336-3394](https://orcid.org/0009-0000-1336-3394)

Monika R. Dabas, Postgraduate Student, Lipetsk
State Technical University, Lipetsk, the Russian
Federation.

Сараев Павел Викторович, доктор
технических наук, доцент, профессор,
Липецкий государственный технический
университет, Липецк, Российская Федерация.
e-mail: psaraev@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-1373-2521](https://orcid.org/0000-0002-1373-2521)

Pavel V. Saraev, Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor, Professor, Lipetsk State
Technical University, Lipetsk,
the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2023; одобрена после рецензирования 22.12.2023;
принята к публикации 26.12.2023.*

*The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 22.12.2023;
accepted for publication 26.12.2023.*