

2. Волков Е.В., Суслов С.М. Об аэродинамическом сопротивлении циклонных камер при циркуляции твердой дисперсной фазы в ее объеме// Тр. УПИ. Свердловск. – 1974. – Вып. 227. – С.58-60.
 3. Вязовский Е.С., Николаев Н.А. Особенности движения капель жидкости в массообменных аппаратах вихревого потока//Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 1972. – Т.15. – С. 936-942.
 4. Cheilytko, A., P'in, S., Lavryonov, A., & Belokon, Y. (2021). RESEARCH OF CYCLONE DESCRIPTIONS FOR GRY CLEANING OF GASES FROM DUST IN METALLURGY. *Scientific Journal "Metallurgy"*, (1), 110-117.
-
-

Yuriy Dobranyuk *, Ph. D.

Andriy Kozub **, student

*Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

e-mail: dobranyuk@vntu.edu.ua

** Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FREE SURFACE OF CYLINDRICAL SAMPLES DURING ROLLING USING SCM MAPLE

Abstract. The analytical expressions for accumulate strain's and stress state parameter definition on the basis approximation of dependence between axial and round strains is received. A comparative analysis of deformation trajectories of simulation modeling using SCM Maple is given.

Keywords and phrases: stress-strain state, free surface, stress state parameter, accumulated strain, accumulated damage, rolling, Maple, differential equation.

При розробці процесів вальцювання важливими задачами є оцінка формозміни, напружено-деформованого стану (НДС) та деформівності матеріалу заготовок. Особливо актуальною така оцінка є для процесів холодного формування вальцюванням при необхідності досягнення значних ступенів деформації [1 - 12].

Під час вальцювання, у зв'язку із нерівномірністю деформацій, відбувається викривлення форми вільної поверхні, від якого залежить напружено-деформований стан та граничні деформації матеріалу [1 - 17].

Метою даної роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану циліндричних зразків під час вальцювання із використанням СКМ Maple на основі математичного аналізу.

Залежність між осьовою та коловою деформаціями $\varepsilon_z = f(\varepsilon_\varphi)$ можна апроксимувати у вигляді розв'язку диференціального рівняння з відокремлюваними змінними [1, 2, 3, 4, 11, 16]

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{\xi \cdot p^2 \cdot \varepsilon_\varphi^2 + k}{p^2 \cdot \varepsilon_\varphi^2 + k}, \quad p > 0, \quad (1)$$

де p, ξ, k – константи, які визначаються експериментально.

Очевидно, що величини ξ, k, p будуть визначатися умовами тертя між заготовкою та інструментом, матеріалом досліджуваної заготовки та її типорозмірами.

Розв'язком диференціального рівняння (1), із урахуванням початкової умови $\varepsilon_z|_{\varepsilon_\varphi=0} = 0$, отримаємо [1, 2, 9, 10, 15, 16]

$$\varepsilon_z = -\xi \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{1}{p} \cdot (k - \xi) \cdot \operatorname{arctg}(p \cdot \varepsilon_\varphi). \quad (2)$$

Використовуючи вирази для обчислення показника напруженого стану та накопиченої деформації на вільній бічній поверхні при деформуванні та співвідношення (2) отримано узагальненні співвідношення для оцінки напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричного зразка під час вальцювання [1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 15, 16]:

$$\eta(t, \xi, k) = \frac{\sqrt{3} \cdot (1 - \xi - (k - \xi) \cdot \cos^2(t))}{\sqrt{1 - (1 - \xi) \cdot \xi - [1 - 2 \cdot \xi - (k - \xi) \cdot \cos^2(t)] \cdot (k - \xi) \cdot \cos^2(t)}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_u(t, p, \xi, k) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot p} \cdot \int_0^t \sqrt{(k - \xi)^2 + \frac{(2 \cdot \xi - 1) \cdot (k - \xi)}{\cos^2(\tau)} + \frac{\xi^2 - \xi + 1}{\cos^2(\tau)}} \cdot d\tau. \quad (4)$$

Також було проведено дослідження процесу вальцювання із використанням імітаційного моделювання в програмному комплексі DEFORM 3D. Отримані значення осьової та колової деформацій під час імітаційного моделювання, було апроксимовано співвідношенням (2) із використанням розробленої процедури в СКМ Maple із використанням пакету optimization та побудовано відповідний графік (рис. 1).

```
> restart;
with(Optimization):
with(plots):
> data_A := [[-1, 0], [-.913307374, .87e-2], [-.895268744, .17682e-1], [-.909067791, .60291e-1], [-.860639114, .125253], [-.84980456, .133413], [-.838489892, .14158], [-.826753866, .14975], [-.81429968, .157915], [-.800769023, .166065], [-.786719424, .174192], [-.772371834, .182293], [-.758064751, .190367], [-.743884661, .198416], [-.730360835, .206437], [-.715806186, .214422], [-.701096834, .222366], [-.685630682, .230264], [-.669800058, .23811], [-.653321754, .245902], [-.636263146, .253639], [-.618528361, .261318], [-.600587402, .26894], [-.581781281, .276502], [-.562672325, .284004], [-.542896959, .291447], [-.522633872, .298828], [-.502016749, .306148], [-.480410536, .313405], [-.458133535, .320599], [-.435430755, .32773], [-.412002595, .334797], [-.388016354, .341797], [-.363541436, .348733], [-.338642094, .355605], [-.313319426, .362413], [-.287648235, .369158], [-.261739689, .375841], [-.235525873, .382461], [-.209111602, .389021], [-.18215416, .395521], [-.155569004, .401963], [-.12860172, .408348], [-.101455889, .414676], [-.73617837e-1, .420947], [-.46008918e-1, .427165], [-.18071445e-1, .43333], [.10161435e-1, .439445], [.38172249e-1, .445511], [.66268011e-1, .451531], [.9422861e-1, .457506], [.121475014, .463437], [.148290309, .469326], [.174529208, .475175], [.200636576, .480986], [.226274226, .486763], [.246904439, .492519], [.267520008, .498261], [.331456225, .50069], [.362345501, .506011], [.362935174, .511228], [.373046093, .516529], [.428674643, .521851], [.448581047, .527136], [.468378663, .532414], [.484104453, .537693], [.494841052, .542995], [.515339334, .548347], [.534275614, .553719], [.542328905, .559144], [.557364819, .564696], [.572384834, .570301], [.578645724, .575991], [.612924842, .580877], [.617078879, .586731], [.636370713, .598386], [.64726274, .604197], [.662687837, .609961], [.671119316, .615773], [.678155501, .62165], [.686711116, .63401], [.689871121, .640378], [.740448845, .663176], [.745571531, .684143], [.74892529, .691393]];
[0, 0.004834, 0.009909, 0.014908, 0.019699, 0.024366, 0.028967, 0.033544, 0.038085, 0.042546, 0.04699, 0.051446, 0.055939, 0.060473, 0.06505, 0.069673, 0.074344, 0.079062, 0.083824, 0.088629, 0.093475, 0.098359, 0.103279, 0.108233, 0.11322, 0.118236, 0.123278, 0.128344, 0.133432, 0.138539, 0.143666, 0.148812, 0.153975, 0.159157, 0.164357, 0.169575, 0.17481, 0.180061, 0.185332, 0.190621, 0.195927, 0.201252, 0.206595, 0.211956, 0.217335, 0.222732, 0.228147, 0.233579, 0.239028, 0.244495, 0.249978, 0.255479, 0.260997, 0.266532, 0.272082, 0.277649, 0.283233, 0.288836, 0.294459, 0.300101, 0.305764, 0.311447, 0.317148, 0.322865, 0.328599, 0.334352, 0.340125, 0.345921, 0.351742, 0.357602, 0.363193, 0.368885, 0.37468, 0.380438, 0.386247, 0.392083, 0.397982, 0.403961, 0.409993, 0.416105, 0.422368, 0.428704, 0.435142, 0.439915, 0.446745, 0.453326, 0.459974, 0.466574, 0.47315, 0.4798, 0.486533, 0.493457, 0.500605, 0.50786, 0.5143, 0.525447, 0.533585, 0.541631, 0.549897, 0.55822, 0.5592];
[0, -0.008682, -0.017633, -0.026468, -0.035066, -0.043479, -0.051829, -0.060125, -0.068354, -0.076475, -0.08452, -0.092517, -0.100577, -0.108676, -0.116789, -0.124911, -0.133038, -0.141169, -0.149298, -0.157419, -0.165521, -0.173594, -0.181636, -0.189645, -0.197623, -0.205569, -0.213471, -0.221327, -0.229128, -0.236871, -0.244553, -
```

```

0.252171,-0.259723,-0.267207,-0.274622,-0.281968,-0.289242,-0.296444,-0.303573,-0.310627,-0.317604,-
0.324504,-0.331325,-0.338065,-0.344724,-0.351302,-0.3578,-0.364216,-0.370551,-0.376806,-0.382979,-
0.389072,-0.395087,-0.401023,-0.406879,-0.412657,-0.418356,-0.423979,-0.429526,-0.434998,-0.440397,-
0.445725,-0.450981,-0.456167,-0.461285,-0.466337,-0.471325,-0.476264,-0.48116,-0.486744,-0.491012,-
0.495323,-0.499589,-0.503822,-0.508005,-0.512159,-0.516295,-0.520437,-0.524557,-0.528686,-0.532886,-
0.537094,-0.541337,-0.546293,-0.550393,-0.554612,-0.558817,-0.562993,-0.567095,-0.571193,-0.575307,-
0.579556,-0.583923,-0.588317,-0.593227,-0.598781,-0.603227,-0.607872,-0.612539,-0.617339,-0.617908]:
data_B:=zip((x,y)->[x,y],%,%);
data_B[101,1];
Ez_E_phi:=(x,m,a,q)->-a*x-(q-a)*m*arctan(x/m);
E[z]=Ez_E_phi(E[phi],m,a,q);
res_Sm_B:=map((zz)->Ez_E_phi(zz[1],m,a,q)-zz[2],data_B):

```

$$E_z = -a E_\phi - (q - a) m \arctan\left(\frac{E_\phi}{m}\right)$$

Обчислюємо параметри апроксимації по методу найменших квадратів із використанням команди Optimization[LSSolve] та будемо відповідну апроксимацію\

```

sol_Sm := LSSolve(res_Sm_B, {m>=0.0001});
eval(Ez_E_phi(x,m,a,q),sol_Sm[2]);
sol_Sm := [0.0000181330286534944033 ,
[a = 0.181181723022019098 , m = 0.285132630482256788 , q = 1.82498389230558145 ]]
-0.181181723022019098x - 0.4687016365arctan(3.507139812x)

Lf:=eval(Ez_E_phi(x,m,a,q),sol_Sm[2]),data_B]:
G2:=plot(Lf,x=0..data_B[101,1],style=[line$(nops(Lf)-
1),point],symbol=CIRCLE,symbolsize=8,color=[RED,black],thickness=[2,1],labels=['`,``,``],linestyle=[1,1]):
g40:=PLOT(
TEXT([-0.08,-1.1], 'e', FONT(SYMBOL,14)),COLOR(RGB, 0.1, 0, 0),
TEXT([-0.06,-1.12], "z", FONT(TIMES,ROMAN,12)),
TEXT([0.8,-0.05], 'e', FONT(SYMBOL,14)),
TEXT([0.82,-0.07], "j", FONT(SYMBOL,12)),
AXESSTYLE(NORMAL)):
display({G2,g40},view=[-0.08..0.56,0..-0.62]);

```

Використовуючи співвідношення (3) та (4) та результати апроксимації, побудовано траєкторії деформування для небезпечної, з точки зору накопичення пошкоджень, точки зразка як за результатами апроксимації співвідношенням (1) експериментальних даних, так і самих експериментальних значень накопиченої деформації та показника напруженого стану, отриманих під час імітаційного моделювання процесу вальцювання. Відповідні результати були опрацьовані розробленою процедурою в СКМ Maple та представленні на рис. 2.

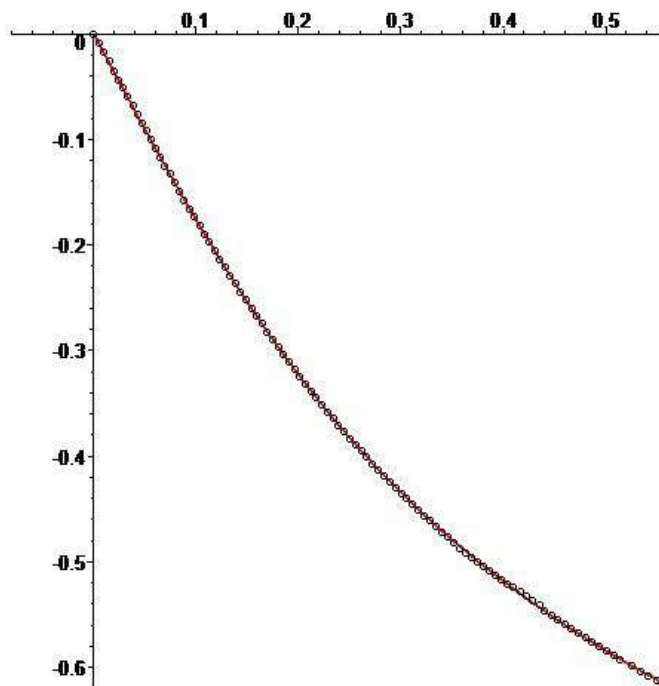


Рис. 1 – Апроксимація залежності між компонентами деформації небезпечної, з точки зору накопичення пошкодження, точки заготовки із використанням СКМ Maple [1, 2, 9, 11, 16]

```
> subs(sol_Sm[2], m) * tan(t) = data_B[101, 1];
TT := fsolve(%, t);
Eu := (t, m, a, q) -> 2/3 * m * 3^(1/2) * Int((1 + (-a - (q-a) * cos(t)^2)^2 - a - (q-a) * cos(t)^2) / cos(t)^2)^(1/2), tau=0..t);
ET := (t, a, q) -> 6 * (-a - (q-a) * cos(t)^2 + 1) / (9 + 3 * (-2 * a - 2 * (q-a) * cos(t)^2 + 1)^2)^(1/2);
h0 := plot(data_A, thickness=2, color=red);
h2 := plot([ET(t, subs(sol_Sm[2], a), subs(sol_Sm[2], q)), Eu(t, op(subs(sol_Sm[2], [m, a, q]))), t=0..TT], linestyle=[1, 3], thickness=[2, 1], color=[blue, black]);
h40 := PLOT(
TEXT([-0.12, 0.63], 'e', FONT(SYMBOL, 14), COLOR(0.1, 0, 0),
TEXT([-0.10, 0.62], "u", FONT(TIMES, ROMAN, 12),
TEXT([0.9, -0.04], 'h', FONT(SYMBOL, 14)),
AXESSTYLE(NORMAL));
display({h0, h2, h40});
```

$$0.285132630482256788 \tan(t) = 0.5592$$

$$TT := 1.099265017$$

$$Eu := (t, m, a, q) \rightarrow \frac{2}{3} m \sqrt{3} \int_0^t \sqrt{\frac{1 + (-a - (q-a) \cos(t)^2)^2 - a - (q-a) \cos(t)^2}{\cos(t)^2}} dt$$

$$ET := (t, a, q) \rightarrow \frac{6(-a - (q-a) \cos(t)^2 + 1)}{\sqrt{9 + 3(-2a - 2(q-a) \cos(t)^2 + 1)^2}}$$

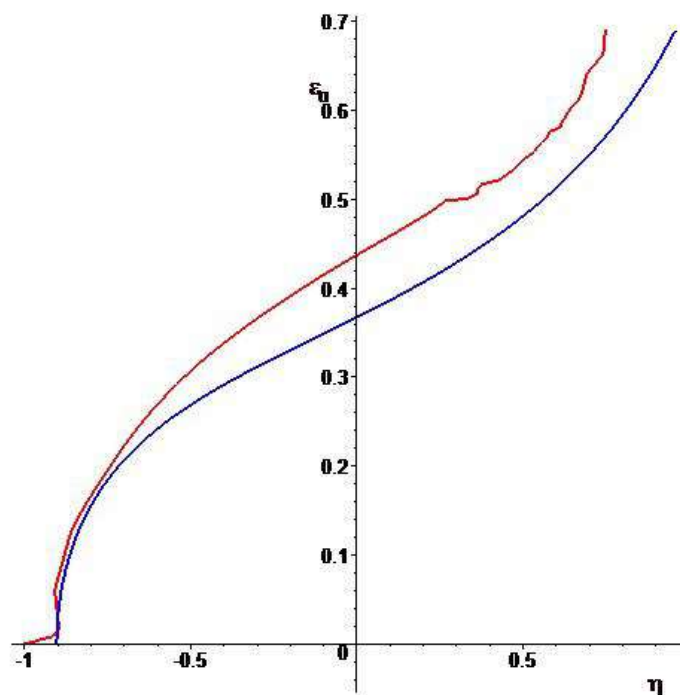


Рис. 2 – Порівняльне графічне представлення напружено-деформованого стану, отриманого за допомогою імітаційного моделювання вальцювання та за допомогою співвідношень (3) та (4) в результаті апроксимації залежності між компонентами деформацій [1, 2, 10, 11, 16]

Частина математичного апарату та розроблені фрагменти коду в СКМ Maple, які представлено в даній роботі, покладено в основу розроблених інформаційних технологій експериментально-аналітичного моделювання деформованого стану матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричних процесів деформування із вільною поверхнею.

References

1. Mykhalevych V. M. Modeling of stress-strain and limited states of cylindrical billets during face-end compression: monograph / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk. - Vinnytsia: VNTU, 2013. - 180 p. ISBN 978-966-641-532-8. (in Ukrainian).
2. Mykhalevych V. M. Modeling of plastic strain of a cylindrical billet during face-end compression / V. M. Mykhalevych, A. A. Lebedev, Yu. V. Dobranyuk // Probl. strength. - 2011. - No. 6. - P. 5–22. (in Russian).
3. Mikhalevich V. M. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression / V. M. Mikhalevich, A. A. Lebedev and Yu. V. Dobranyuk // Strength of Materials. – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603, DOI: 10.1007/s11223-011-9332-7.
4. Mykhalevych V. M. Prediction of the limit state lateral surface of a cylindrical billet during face-end compression / V. M. Mykhalevych, V. A. Matviychuk, Yu. V. Dobranyuk, E. A.

- Trach // Metal processing by pressure: collection of scientific papers. - Kramatorsk: DSMA - 2012 - No. 1 (30) - P. 24-30.
5. Dobranyuk Yu. V. Modeling with using of the software complex DEFORM 3D of the stress-strain state of the lateral surface of a cylindrical billet during face-end compression / Yu. V. Dobranyuk, L. I. Aliyeva, V. M. Mykhalevych // Metal processing by pressure: collection scientific works. - Kramatorsk: DSMA - 2010 - №4 (25) - P. 3–10.
 6. Mykhalevych V. M. Improvement of the experimental part of the experimental-analytical method of research of the stress-strain state of the lateral surface of a cylindrical billet during face-end compression [Electronic resource] / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, E. A. Trach // Scientific works of Vinnytsia National Technical University. - №4. - Kyiv: National Library V. I. Vernadsky. - 2011. - 8 p. - Journal access mode: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_4/2011-4.files/uk/11vmmwas_ua.pdf.
 7. Mykhalevych V. M. Determination of the initial section of the trajectory of strains of the limited state of the lateral surface of a cylindrical billet during face-end compression / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, E. A. Trach // Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute. - 2012. - №2 - P. 163–167.
 8. Gun'ko I. V., Dobranyuk Yu. V. Evaluation of blank deformability during rolling / I. V. Gun'ko, Yu. V. Dobranyuk // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. - 2013. - Vol. 15 - N. 4. - P. 254–261.
 9. Mykhalevych V. M. Stressed state of thick-walled pipes under uniform pressure / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk // Bulletin of engineering and transport. - Vinnytsia: VNTU, 2016. - №1 - P. 67–72.
 10. Sevostyanov I. V. The development process of rolling the curvilinear blanks from aluminum alloys / I. V. Sevostyanov, Yu. V. Dobranyuk, I. A. Bubnovska // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. - Vinnytsia: VNTU, 2017. - №2 (6) - P. 150–157.
 11. Mykhalevych V. M. Generalization of experimental and analytical methodology for assessing the mode of deformation of cylindrical blank's lateral surface during axial-symmetric compression / V. M. Mykhalevych, V. A. Matviychuk, Yu. V. Dobranyuk, E. A. Trach // Processing of metals by pressure: a collection scientific works. - Kramatorsk: DSMA - 2014 - №1 (38) - P. 41–47.
 12. Mykhalevych V. M. Modeling of limited strains on a free lateral surface during high-temperature face-end compression / V. M. Mykhalevych, V. O. Kraevskiy, Yu. V. Dobranyuk // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. - Vinnytsia: VNTU, 2015. - №2 - P. 54–60.
 13. Mykhalevych V. M. Formation of cylindrical blank's lateral surface during axial-symmetric compression / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, E. A. Trach // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Thematic issue: New solutions in modern technologies. - Kharkiv: NTU "KhPI" - 2013. - №42 (1015) - P. 126 - 131.
 14. Mykhalevych V. M. Analytical representation of the radius of cylindrical blank's lateral surface during axial-symmetric compression / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, E. A. Trach // Metal processing by pressure: a collection of scientific papers. - Kramatorsk: DGMA - 2015 - №2 (41) - P. 56–62.
 15. Mykhalevych V. M. Dependence of the maximum diameter of the blank on the degree of strain during axial-symmetric compression / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk // Progressive Engineering, Technology and Engineering Education: Abstracts of the XVI International Scientific and Technical Conference - NTUU "KPI" - Odessa - June 22-25, 2015 - P. 83–84.

16. Mykhalevych V. M. Analytical representation of the maximum radius cylindrical billet during axisymmetric compression with barrels forming / V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. - Vinnytsia: VNTU - 2015 - №1 - P. 59–66
 17. Mykhalevych V. M. Improvement of the method of solving the two-dimensional problem of pressing the staff / V. M. Mykhalevych, V. O. Kraevskiy, Yu. V. Dobranyuk. // Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical engineering series. - 2016. - №2 (77). - P. 79–88.
-

Vitalii Klochko*, Dr. Sc.

Oksana Klochko**, Dr. Sc.

*Vinnytsia National Technical University,
Ukraine

e-mail: klochko@vntu.edu.ua

**Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine

e-mail: klochko.ov@vspu.edu.ua

APPLICATIONS OF SOME SPECIAL FUNCTIONS IN MATHEMATICAL MODELING

Abstract. The possibility of application of methods of mathematical modeling on the basis of system of orthogonal functions, and also Lambert's functions, perspective of a direction in the decision of problems of increase of level of designing of corresponding technological processes of manufacture is substantiated.

Key words and phrases: orthogonal finite functions, mathematical modeling, Lambert's function.

Сучасний фахівець не може успішно вирішувати професійні задачі, що стоять перед ним, не володіючи необхідними знаннями про предмет своєї діяльності, про способи і засоби, та приймати творче вирішення цих задач. Математика є теоретичною базою й інструментом пізнання більшості навчальних дисциплін. Вдалих пошук і розробка реального проекту неможливі без використання апарата і методів сучасної математики. Більш того, математичне моделювання і наступна математична алгоритмізація уможливають залучення сучасних ІКТ з метою ефективнішого розв'язання проблем. Їх розв'язування зумовлює пошук нових підходів до застосування сучасних програмних засобів підтримки математичної