

?????????????. ?????????????? ?????????????? ?????? ?????? ?????? ?????????????? ?????????????? ? ?????????????? ??????????, ?? ?
 ?????????? ?????????? ?????????? ??????????-????????????????? ?????? ? ????????? ? ?????????????????????????? ??????????????????
 ??????????????. ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?????? «????????????? ????? – ?????????? ?????»
 ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ?????? ?????????? ? ?????? ?????????????? ?????? ?????????????????? ?????????????????, ????? ?
 ?????? ?????????????? ?????????? (DEM).

???????? ??????????? ?????????? ?????????????????????? ??????? ????????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ? ???????
 ?????????????????????????? ? ?????????????????????? ?????????????????? ? ?????? Aikins et al. [1] ?????????? ?????????????? ???????????
 ??????????-???????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????, ?? ????????????? ?????????????? ????????????? ?????? ? ?????????? ??
 ??????? ????????. ?????????????? ?????? ? ?????????? ??????? ?????????????? ??????? ??????? ?????? Ye et al. (2023) [2], ??????????????
 ?????????? ?????????????? ?????????????? ??????? ??????? ?? ??????? ??????????-????????????? ???????????????.

? ?????? ?????? ?????????? Ye?lkaya et al. (2025) [5] ?????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????????????? ?????????????? ??
 ?????????????????? ?????????????????? ??????, ?????? ?????????????????? ?????????? DEM-?????.

???? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????????? ?????????? ?????????????? López-Bravo et al. (2019) [8],
 ?????????????????????? ?????????????? ?????????????? DEM-????????????????? ??? ?????? ?????????? ?????? ?????????????????????? ??????????
 Hu ? ??. (2023) [9] ?????????????? ?????????????????? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????? ?????? (SPH), ? Bradley, Jaksza
 ? Kuo (2024) [10] ?????????? ?????? ?????????? ?????????? ??? ?????????? ?????????? ?????????? ??? ?????????????????? ??????????????

????????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????????????????????? ?????????????? ?????????????? ?? ?????????? ? ?????????? ?????????? ??????????. ?????? ? ??, (2025) [14] ?????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????????? ??????????, ?????????????? ?????????????????? ? ?????? ?????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????? 3D-?????. ?????? ? ???????? (2025) [15] ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ??????? ?? ?????????? ? ?????????? ?????????? ??????????.

????????????? ??????? ?????????????? ?????????????????????? ?????? ?????????? ? ?????? ?????????? ? ?? (2025) [19], ?? ?????? ?????? ?????????????? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?? ?????????? ?????????? ??????. ?????????? ?????????????????????? ?????????????? ?????? ??????? [20, 21], ?????????????? ?????????? ?? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ??????? ??????? ? ?????????- ?????????????? ??????.

?????????? ?????? ?????????????? ?????????????? ?????? ? ???????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????? ?????? ??????. ????????? ?? ????????? ????????? ?????????-????????????? ?????????????? ? ?????????????? ?????????????????????? ??????, ?? ?????????????? ?????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? - ????????? ????????? ????????? ? ??????????????. ?????????????? ?????? ?????? ?????????????? ????????? ? ?? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????? ??????????????, ?? ?????????? ?????? ?????????, ?? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ????????? ??????????????. ?????? ???, ?????????????? ?????????????????????? ?????????????? ??????, ?????????????????? ?? ?????????????????? ?????? ?????? ?????????? ?????????????? ??????????????.

????????? ? ???????

?????? ????????????????

??? ?????????? ?????????? ?????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? (Discrete Element Method). ?????????? ?????? ?????????????? ?????????????????? ?????????????? ?????? ? ?????????? ??????–????????????????? ??????????????????. ?????????????????? ?????? ?????????? ? ?? ?????????? ? ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?????????? [3, 17]. ?? ?????????????? ?????? ?????????????? ?????????????????????? ?????????????? ?????????????? ?? Object Pascal, ?????????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????? ?????????????? ??????????????????.

?????? ? ??????? ??????????????

????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ??????????–????????????????? ??????????????????.

????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ?????????????????????? ?????????????? ?????? ? ?????????? ?????????????????????? ?????????????????????? ?????????? ?? ?????????????? ??????????????.

? ?????????? ?????????????????????? ??????????, ?????????????????? ?? ??????????????????, ??????????:

–????????? ?????????? ??????????: ?????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????????? (?) ? ?????? ?????????????????? ?? ?????????? ?????????? ?????? (h);

–????????????????? ??????????: ??? ?????????????????? ?????????? ?????? (Ex).

????????????????? ?????????????????????? ?????????????? ?????? ?????????:

–????? ?????? ????????? (y);

–????? ?????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????? (?);

–????????????? ?????????? ?????????????? ?????? ?????????????? ?????????? (x).

????????????????? ?????????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????????? ?????? ??? ?????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????? 18-22%, ?????????? ?????????? ?????????? E = 8-12 ??? ? ?????????????? ? ?????????????????? ?????????? 1.35-1.45 ?/?³ [4].

??? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ??????, ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????? ??????????????????. ?????? ?????????? ??????????????????:

–????????????? ?????????????? ??????;

–????????????? ?? ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????;

–????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????.

? ?????? ?????? ?????????? ?????? ?????????????????? ?????????? ??????????–????????????? ?????? ?????? [22-24], ? ?????????? ?????????? ?????? ?????????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ??????. ?????? i–? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?????????????? ??????????:

–????????????? ?????????? (xi, yi, zi);

–????????????? ?????????? ?????????? (vxi, vyi, vzi).

????????? ?????????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????? ?????????, ?? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ??????????:

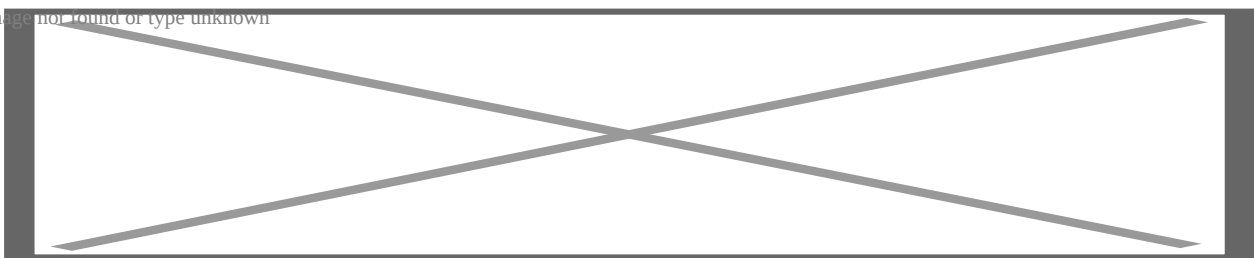
–????????????? ?????????????? ?????????;

–????????????? ?????????? ??????;

–????? ?????????????? ? ??????????????;

–????????????????? ? ?????????? ??????????

Image not found or type unknown

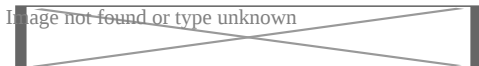


(1)

??? i – ?????? ?????????; ? – ?????????? ?????????????? ?????????????? (????? ?????????? ?????????? "x", "y", "z"); N? – ?????????????? ??????????; mi – ?????? ?????????; t – ??????; j – ?????? ?????????, ?????????? ?????????????????? ? i–? ??????????; ?ij

–????????? ????????? ?????????????? ????????? $i \neq j$ (????????????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ??????) $k_{ij} \neq k_{ji}$ –
????????????????? ?????? ?????? ?????????? $i \neq j$?????? ? ??????; d_i – ???????? i –?? ??????????; r_{ij} – ?????????? ?????? ?????????? ?????????? $i \neq j$
; P_O – ?????????????? ?????????????? ?????????????????? ?????? ?????????????? (????????????? ? ?????????????? 1,0...1,1 ? ?????????????? ?? ?????? ??????); N
? – ?????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????? ??????; P_i – P_j , k_{P_i} – P_j ? k_{P_i} – P_j – ?????????????????? ?????????????, ??????? ? ?????????
????????? ?? ?????????????????? ?????????? $i \neq j$?????????????????? j ; r_i – P_j – ?????????????? ?? ???????? i –?? ?????????? ?? j –? ??????????????; x_i – P_j , y_i – P_j , z_i
– P_j – ?????????? ?????????????? ??????–????????? ?????? ?????????? $i \neq j$?????????????? j ; v_{P_j} – ?????????????? ?????????? ?????? j –? ??????????????
?????????????; [...] – ?????? ?????????; g – ?????????? ?????????????? ?????????.

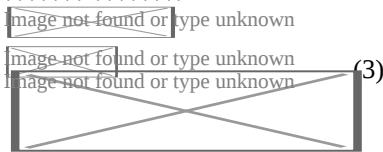
????????????? r_{ij} ?????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?? ?????? ?????? ?????????????????? ?????? ?????????????? ?????????? ?? ?????????
??????????:



????????? ?????? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, ?????????????? ?????????????
????????? ?????????? ?????? ? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ??????????
????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? (?? 128 ?????????????????? ?????????????????? ??? ?????????? ??????, ?????????????? ?? 34 ??????)
????????? ?????????????????? ??????????????, ? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? r_{ij} ?????? ?????????? ?????????? $i \neq j$??????????????????
????????????????? j . ?????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? c_{ij} ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?????????? ??
????????????? ?????? ?????????? ?????? E :



??? ? – ?????????? ?????????? ?????????? ??????; d – ?????????? ??????????; k – ?????????????? ?????????????? ??????????????, ??????????????
????????????????? ?????????????? ?????????????????? (????????? ?????? ??????????????) ??? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ??????
????????????????? ?????? ?????????? ? ?????? ?????????? ??????????. ?????????? ?????? ?????????? ?? ??? ?????? x, y, z ?????????? ? ??????????
????????? t ?????????? ??????????



??? x_0, y_0, z_0 – ?????????? ?????? ?????????? ?? ??? ?????? ? ?????????? ?????? ?????????? ($t = 0$); v – ?????????? ?????????????? ??????????
?????????; z – ?????????????? ?????????????? ?????????? ?? ??? ?????? ? ?????????? ??????????; t – ?????????????? ?????????? ??????????????
????????????? ?????? (?? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? $t = 0,25$?).
??? ?????? ?????????????????? ?????????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?
????????? ?????? ?????????????????? ??? ?????????? ?????????????, ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????? ? ??????????????????
?????????. ??? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ??? ??????????
– $S(y, z)$ – ?????????? ?????????????? ?????????? ??????, ?????????????? ?????????? 1 ??? 0, ? ?????????????? ?? ????, ?????????? ?? ??????????????
????????? ?????? ?? ?????? ?????????????? (y, z).
– $\gamma(y, z)$ – ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????????? ?????????? ??????????
??? ?????????? ?????????? $S(y, z)$? $\gamma(y, z)$?????????????? ?????????????? ?????? ?????????????? ?????????? x ?? ?????????????? 1 ?, ?? ?????????? x_1
?? ?????????????????? ??????, ?????????????????????? ?????? ?????????????????? ?????? ?????????? ?? ?????????? x_2 , ?????????????????????? ??????????
????????? ?????????? ?????????????????? ??????????????. ?????????? $S(y, z)$? $\gamma(y, z)$?????????????? ?????? ? ??? ?????????? ?????????? ??????. ? ??????
????????? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????? 120?40, ?????????? ??
????????????????? ?????????? ??????????????????
?? ?????????? $S(y, z)$?????????????????? ?????????? ?????? h ?????????? ??? ?????????? ?????????? ??????????



??? b – ??? ?????????????????? ??????????????????; $y_1 \neq y_2$ – ??????????, ?????? ?????????? ?????????????? ?????????; [...] – ?????????? ?????????????? ??
????????? ??????; z_j – ?????????? ??????, ?????????????????????? ?????? j ?????? ?????????????????? ??????????????????; h_0 – ?????? ??????????????????
????????????????? ??????
????????? ?????????? ?????? ? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????? ??????????

