

????????

???????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ? ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? [1]. ?????????? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? (????) ?????????????? ?????? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ? ?????????????? ?????????????? - ?????? ????? ? 10-30 ??? ?????? ?????????????? ?????? [1]. ?????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????, ?????????? ?????????? ?????? ? ?????? ?????? 10% [1].

????????????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????? (DroneSeed, AirSeed, Flash Forest, DroneCoria) ?????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ??????????. ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????? ? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????????? ?????????, ?????????????? ?????????????? Dendra Systems, Flash Forest, AirSeed Technologies ? Ghaf Tree Project.

????????? ?????????????????? ?????????????????? ??? ?????????? ??????????, ?????? ?????? ?????????????? ?? ?????????, ?????????????? ?? ?????????, ? ?????????????? ? ?????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????, ?? ?????? ?????????? ?????????? ?????? ?????????? [2], ? ?????? ?? ??????????????-????????? ?????? ?????????? ? ??????, ??? ?????????? ?????? ?????????? ?????????? [3].

??? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? ?????? ? ?????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?????????????????????? ? DEM-?????. ?????????????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????? ?????????????????? ?????? ?????????? ? ?????? Hou M. ? ?. [6] (?????? 1?), ??? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????.

????????????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????? ?????????????? Ye X. ? Van Der Meer D. [7], ?????????????????????? ?????????????? ?????????????????????? ? ?????????? ?? ?????? ?? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ??????????????

?? ?? ?????? ????. ?????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????? Zhang X. ? ?????????? ?????????? [8-10], ? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?? ?????????? ?????, ??? ?????????????????? ? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ??????????

?????? ?????????? ?? ?????????????????? ?????????? ?????? ? ?????? ?????????? ??? ?????????????????? ?????????? ?????????? Carvalho D.D. ? ?. [11] ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????? ? ?????????????????? ??????, ?? ?????????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?? ?????????? ? ?????????????????? ??????????

????????????? ?????? ?????????????? ??????????????, ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? (DEM), ?????????????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????? ??????

? ?????????????? Ye X. et al. [12] (?????? 1?) ????????? DEM ?????? ?????????? ??? ?????? ? ?????????????????? ??????. ?????? ?????????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ?? ??? ?????? ? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ??????????

?????? Shen W. et al. [13] ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? ?? ?????????? ?????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ??????????. ?????? ?????????????????????, ?? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????? ?????????? ?? 30% ?????????? ? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? (? 25%).

? ?????????????? Liang S. et al. [14] ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ? ?????????? ?????????? ??? ?????? ?????????? ? ?????????????????? ??????????. ?????????????, ?? ?? 60% ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ?? ??? ?????? ?? ?????? ?????? ??????????

????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????? Zhang X. et al. [15], ? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????? ?????? ?? ?????????? ?????????? ??????????????????. ?????????, ?? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? ?????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?????????????????????? ??????

????????? ?????????????????? ?????????? DEM ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????, ?? ?????????????????????? ? ?????? Lin J. et al. [16]. ?????? ?????????????????? CFD-DEM ?????? ?? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????????????????????? ???.

????????????????? Wada K. et al. [17] ?????????????????? ?????????????????? DEM ?? ?????????????????? ?????????????????????? ?????? (100-900 ?/?) ? ?????????????????????? . ? ?????? Ghazi Alshanti W. [18] ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????????? ?????????.

????????????????? Sunday C. ? ??????. [19, 20] ?????????????????? ?????????????????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????????? ??????. ? ?????? [19] ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????????? ?????????? ?????????? ?????? ?????????????? ?????????????? (DEM) ?? ?????????????????? ?????????? ?????????? ? ?????????? ?????????? ?????????????? . ? ?????????????????? [20] ?????????????? ?????????????????? ?????? ?????????????????? ?? ?????????? ??????????????????, ?????????????? ?????????????????? ??????????

????????????????? Ye X. ? Zhang C. [21] ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?? ?????????? ??????????????????. ?????? ?????????, ?? ? ?????????????????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?? ?????????? ?? ?????????? ? ?????? ?????? ?????? ?????? ?????????????????? ?????? ?????????????????? ??????????

????????? Wang F. ? ??????. [22] ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ?????? ?????????????????? ?? ?????????????????? ?????????????????? ? ?????????????????????? ??????, ?????????? ?? ?????????????????????? ?????????????????? DEM-????????????????? ? ?????????????????????? ??????. ?????????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????? ?????? ?????????? ?????????????, ?? ?????? ?????????? ?????? ?????????, ?????????? ??????????????, ?????????? ?????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????? ?????? ?????? ????. ?????????? ?????? ??????, ?? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ?????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????? ?????? ??-?? ?????????????????? ?????????? ? ?????????? ????, ?????????? ? ?????????? ??????????????????

Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium

Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium
Legend: A – Hou M. et al. [6], B – authors' own modeling results

Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium
Legend: A – Hou M. et al. [6], B – authors' own modeling results

Figure 2. Precision seeding device with acceleration of pelleted seeds by an air flow
Legend: 3D-modeling results | Source: authors' own 3D model

?????????: ?????????? ?????????? ????????| Source: authors' own composition

?????????? ?????????????? (k_{damp}) ?? ?????????? ?????????????? ????????.
 ??????? ?????????? ?????????? ?? ?????????? ??????? ?? (F^Y) ? ?? ?????? ? ?????? ?????? ($F^?$? $F^?$) ??????????????? ?? ???????
 ?????????????? ?????????? (???????? 4). ?????????????? ?????????????? ? ?????????? ??????????? ?????????????? (x, y, z). ?????????? ???????
 ????????? E_i ?????????? ?????? ??????????????: ?????????????? ?? ?????? (x_i, y_i, z_i) ? ?????????????? ?????????? (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}). ??????
 ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????????? ? ?????? ?????? ?????????? [24].

????????? DEM-??????

??? ?????	????? ????????????, t s	????????????? ????????????????? k _{damp} , ?·?/?	????????????? ?????????? kzh, ?/?	????????????? ?????????? ????????????? c _n , ???
???????????	1,05	30	6,0 ? 10 ⁴	0
?????????????????	1,12	40	6,0 ? 10 ⁴	15000
?????????	1,18	50	6,0 ? 10 ⁴	30000

?????????: ?????????? ?????????? ????????| Source: authors' own composition

?????????? ???????? ?????????????? ?????????????? ? ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????? ??????????? ?????????? ??????. ?????
 ?????? ?????????????????? ?????????? ??????????, ?????????? ?????????? ? 1/? ? ?????, ?????????? ?????????? – ?????????????????? ?????????? (???????? 5, ?).
 ?????????? ?????????????? ?????????????????? ? ?????????????? ?????? ? ??????????-????????????????? ??????????, ?????????????? ?????? ??? ??????????
 ????????? (???????? 5, ?).

Figure 5. Monitoring the modeling process: A – color surface diagrams; B – central section

Figure 6. Laboratory stand

Figure 7. Study of penetration of a spherical indenter into soil

????????: ?????????? ??? ????| Source: authors' own photo