????????????. ????????? ????????????? ?????????????????? ???????? ????????????? ??????? ??????? ?????????, ???????? ? ????????? ?????????? ????????????? ? ????????????? ???????? [1]. ???????? ??????????????? ???????, ??? ????????? ????? ??????????, ???????? ?????????? ????????????? ??????? ? ????????????? ?????? ?????????? [2]. ????????? ???????? (??????, ???????) ???????????? ????? ??????? ????? ????????????? ??????, ??????????????????? ? ???????????? ??????????? ??????, ???????? ????? ? ?????????? ?????? ? ???????? ??? ???????, ???????????????? ? ??????? ???????? ???????? ?????? [3,4]. ? ???? ????? ?????????? ?????? ?????????? ?????? ???????? ?? ????????????? ????????????? ????????????? ??????? ? ???????, ?????????? ?? ???????? ????????? ? ?????? ???????????????? ???????? ????????????? ? ??????? «?????? – ????????».

????????? ????????? ??????, ?????????? ?? ?????????? ????????? ?????? ????? ????? ????????? ?????????? ????????? ???????, ???????? ??????????????? ???????? ????????? ?????????? ? ??????????? ??????????? ??????????? ?????? ?????????? ????????? [5]. ?????? ????????????? ? ????????? ????? ?????? ???????????? ? ???????????????? ????????????????? ?????????????: ?????????? ????????????? ???? ??????, ?????????? ??? ??????????????????? ????????????????? ??????? ? ????????? ????????, ?? ?? ??????????? ????????????? ?????? ????????? ??? ????? ?????? [6]. ?????????? ????? ???????????? ???????????? ???????? ????????? ??????????????????? ???????????, ???????? ?? ??????? ? ????? ?? ????????? ??????? ???????, ?????????? ????????????? ????????????? ?????????? ??????????.

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

? ????????? ??????????? ????????????? ???????????????? ? ???????????????? ?????? ???????????? ???????? ????????????, ????????? ? ???????? ?????????? ??????? ????????????? ?????????????. ????? ?????????? ????????? (Discrete Element Method, DEM), ????????????? ????????????? ??? ????? ???????? ?????? ????? [7], ???? ??????????? ???????????? ??? ????????????? ????????, ????????? ? ???????? ????????????, ?????????? ? ??????? ???????????? ?????????? ???????????????? [8]. ??? ???????? ?????????? ???????? ????????????? ????????? ????? [9], ?????? ?????? ? ?????????? ????????? [10], ?????????? ????? [11] ? ????????????? ??????? ??????? ? ????????????? ????????? [12-14].

? ??????? ????????????? ????? ???????????? ????? ???????????? ????????????? ?? DEM-????????????? ????????? ?????????: ????????????? ??????????? ?????? ? ???????, ???????????? ?????????? ??????? ? ?????? ???????? ?????????????. ?????? ??????????? ????????????? ????????? ???????, ???????????? ????????????? ????????? ????, ???????????? ??????? ??????? ? ??????? ????????? ????????, ???????? ????? ????????? ???????. ???????????? ?????????? ????? ???????????? ??????? ??? ?????????? ??????? ???? [16] ??? ???????????? ?? ??????????, ?? ???????? ?????????? ?????????? ? ???????????? ??????. ??? ??????? ???????????? ?????? ????? ????????????? DEM ? ?????????? ??????????? ???????? ? ???????????????? ?????????????. ??????????? ??????????? ???????????, ????????? ? ????????????? ?????? ? ????????? ??? ? ?????? DEM. ?????????????? ??????????? ?????????? ?????? ??? ??????-?????? ??????????, ?????? ?????????? ?????? ? ??????? ? ????????, ? ????? ????????? ????? ???????? ? ?????????? ????????? [18, 19]. ??? ????????? ????????? ???? ? ???????? ???????????????? ?????????????? ??????? ????????, ????????? ??????? ????? ???? ?????????? ???????????????, ????????, ? ??????? ??????? ????????????????? [20]. ??? ?? ?????, ?????????? ????? ??????????? ??????? ? ???????? ?????????? ?????????????? ?????????, ????? ??? ????????? ??????, ??????? ??????????? ???????????? ? ??????? ????????? [21].

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

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

1. ??????? ?????????? ??????????? DEM-??????, ????????????? ??? ????????? ??????????? ??????????: ????????? ????????? ????????? ????? ? ?????????? ??????-?????? ????????, ???????????????????? ?????? ??????? ? ?????? ????????????? ??????, ? ????????? ????????????? ????????? ?????????? ???????.
2. ??????????? ? ??????????? ???????? ??????? ????????? ???????????????????? ????????? – ???? ??????????? ?????? ??????? (F_c) – ?? ?????? ????????????? ??????? ?????????? ?????????????? ? ???????????? ????????????.
3. ????????? ?????? ???????????????? ???????????? ???????????????????? ???????? ????? ????????????? ??????? ????????? ?????? ? ?????????? ??????? ? ??????? ????????? ?????? ???????? ??????? ?????, ??? ????????? ????????????? ?????????? ??????? ????? ??????.

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

2.1. ?????? ?????????????
? ?????????????? ??????

???????? ???????????? ???????? ??????? ???????, ???????????????? ? ???????????? ??????? ????????? ???????? ???????????????? ????????.

??????? ???????????? — ????????????????-????????? ????????????? ???? ??????????? ?????? ??????? ??????? *Fc(xc,t)* ? ?? ??????????? ?? ???????????????? ?????????? ????????.

? ?????? DEM ?????? ????????? ??????? ??????????? ????????? ??????? (??????? 1):

- ????????? ????? ????????????? ??? ????????????? ?????? ??????????? ????????? ????????? *d*? , ??????????? ? ????????????????? ????????? ??? ??????????? ???????????? ????????? ????????. ???????? ????????? ????? ????? ??????-

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

- ??????? ??????????? ???????????????????? ????????, ????????? ?? 14 ????????? ?????????: 3 ???????? ????????? ???????? ???????, 7 ????????? — ?????, 3 ???????? — ?????. ?????? ??????? ??????????????? ?????? ????????? ???????????????:

  ????? ???????? *ri*? — ??? ???????? ????? ?????????? ???????, ? ??????? ???????? *ri*? — ??? ???????? ? ??????????

  ????. ??? ??????? ???? ????????? (??????, ?????, ?????) ???????? ????????????? ???????? ??????? *ri*? , ????????????? ????????? ? ??????? ??????.

- ?????? ??????????? ????????????? ????????: ????????? ??????? ?????? ???????????????? ??????, ????????? ?? 96 ?????????? ?????? (??????? 3). ??? ???????? ????????????? ???????????, ??? ? ?????????? ??????? ???????? ?? 16 ??????. ??? ??????? ??????? ???????? ????? ????????, ????????????? ????????? ???????? ???????? ???????? ????; ???????????? ? ???????? ?????? ????? ????? ????????? ????????? ??? ????????? ????????.

??????? ???????????? ???????? ????? ?????????? ????????? (Discrete Element Method, DEM). ???????????? ??????? ???????? ??? ???????? ????????? ??????????? ??????????: ??? ??????????? ????????? ?????, ??????? ?? ????? ??????? (???????, ????????, ????????????) ? ??????? ??????? ?????? (???????? — ????? ????????????).

2.2. ???