

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# ПОЧВОВЕДЕНИЕ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

12

---

МОСКВА · 1979

УДК 631.459

В. М. МОСКОВКИН, В. Ф. ГАХОВ

### ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАПЕЛЬНО-ДОЖДЕВОЙ ЭРОЗИИ

Анализируются два главных аспекта капельно-дождевой эрозии — разрушение почвенной структуры и перенос почвы разбрызгиванием, а также намечаются пути устранения этого явления. Приводится расчет силы и давления при ударе капли о поверхность. Методом размерностей получены критерии подобия для процесса капельно-ударного воздействия.

Значительное место в водно-эрозионных процессах отводят капельно-дождевой эрозии, играющей решающую роль в разрушении почвенной структуры. Это обусловлено тем, что энергия и сила падающих капель во много раз превышает соответствующие характеристики склоновых потоков благодаря большой скорости падения капель (4—9 м/сек при изменении размера капель от 1 до 5 мм) и быстротечности удара, длящегося тысячные и десятитысячные доли секунды. Кроме того, из-за малой площади контакта капли с почвой в момент удара создается очень большое давление.

Первые исследования, связанные с изучением капельно-дождевой эрозии, относятся к концу прошлого — началу нашего века [14, 21]. Эти исследования касались размеров и скоростей падения капель, а также удара капель о поверхность жидкости. Но лишь с 40-х годов началось широкое изучение капельно-дождевой эрозии как в теоретическом, так и прикладном плане. Этому в большой мере способствовали работы Эллисона [Ellison, 19, 20], Лоуза [Lows, 22, 23], Экерна [Eckern, 17, 18] и др.

В СССР в последние 15—20 лет также стали уделять некоторое внимание теории процесса [5, 7, 8, 11—13], однако до сих пор не существует его четкой физической схемы, несмотря на то что имеются некоторые предпосылки для ее построения. Для этого достаточно обратиться к работам в смежных областях по ударному воздействию капель на твердые и жидкие поверхности [3, 9, 16, 24 и др.]. Но следует особо отметить, что моделирование удара капель о почву связано с большими дополнительными трудностями, обусловленными ее рыхлой (пористой) структурой. В капельно-дождевой эрозии выделяются два основных аспекта проблемы: разрушение почвенной структуры при ударном воздействии капель и перенос почвы разбрызгиванием.

Второй аспект проблемы может решаться следующим образом. Следует научиться определять количество разбрызгиваемой почвы в результате удара одной капли при данных параметрах почвы и капли и, определяя количество капель, падающих на ту часть поверхности склона, которая вносит вклад в общий перенос почвы вниз по склону, находить расход почвы в данной точке. Расчет площади указанной поверхности может быть сделан на основе расчета траекторий разбрызгиваемых частиц [5]. Определение количества разбрызгиваемой почвы в результате удара одиночной капли непосредственно связано с первым аспектом проблемы и должно основываться на анализе сил ударного воздействия, поверхностного натяжения, сцепления и др. У несвязного материала силы сцепления отсутствуют, и для него решение первого ас-

пекта проблемы отпадает. Отметим, что захват частичек почвы каплей объясняется силами поверхностного натяжения. При изучении двух указанных аспектов проблемы необходимо учитывать следующие основные пути перехода энергии при ударе и разбрызгивании.

1. Момент удара. Энергия капли переходит в потенциальную энергию упругой деформации капли (при деформации капли происходит также изменение ее поверхностной энергии), теряется в результате вязкой диссипации и расходуется на разрушение структурных связей в почве.

2. Момент разбрызгивания. Энергия упругой деформации, расходуется на вязкую диссипацию и поверхностную энергию, на отрыв почвенных частиц, образование брызг и их кинетическую энергию.

Перейдем к рассмотрению сил и давлений, возникающих при ударе капель о поверхность почвы. Известно, что при кратковременных ударах возникают большие силы, что следует из второго закона Ньютона, на основании которого выводятся формулы для расчета силы удара капель об идеально твердые поверхности:

$$M\Delta v = F\Delta t. \quad (1)$$

Гаджев [1], используя некоторые соотношения для  $\Delta v = V$  и  $\Delta t$ , приходит к следующей формуле для силы удара капли:

$$F = 550 \frac{d_k^3}{1 + d_k^3}, \quad (2)$$

где  $F$  — сила удара, г;  $d_k$  — диаметр капли, см.

Сластихин [11], используя то же соотношение, что и Гаджев [1], для  $\Delta t = \frac{2d_k}{(1 + d_k^3)V}$  и формулу для конечной скорости падения капли

$V = 1300 \sqrt{d_k}$  [10], упростил формулу (2) и предложил уравнение для силы удара:

$$F = 500d_k^3. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) дают близкие между собой результаты. Учитывая, что вес капли равен  $G = \frac{\pi}{6} \rho_k g d_k^3$ , получим следующее соотношение между  $F$  и  $G$  —  $F/G \approx 1000$ .

Проведем расчет силы удара  $F$  без учета коэффициента формы капли  $\lambda = 1 + d_k^3$  и будем определять  $\Delta t$  приближенно, по пути, равному радиусу капли, и средней скорости ( $\bar{V}$ ), равной половине начальной. Тогда из формулы (1) получим

$$\bar{F} = \frac{M\Delta v}{\Delta t} = \frac{\frac{\pi}{6} \rho_k d_k^3 V}{d_k/V} = \frac{\pi}{6} \rho_k d_k^2 V^2. \quad (4)$$

Эта формула даст немного завышенные результаты, так как скорость при ударе затухает не по линейному закону, а быстрее и  $\bar{V} < \frac{V}{2}$ . Дадим сравнительную оценку результатов, полученных по формулам (4) и Сластихина [11], с экспериментальными данными Листопада и Чижикова [6] (таблица).

Для сравнения брали формулу Сластихина [11]

$$F = 0,385 \sqrt{d_k} d_k^2 V, \quad (5)$$

где  $\bar{F}$  — сила удара, г;  $d_k$  — диаметр капли, см;  $V$  — начальная скорость капли, см/сек.

Сравнение результатов расчета силы удара капель о твердую поверхность с данными эксперимента

Диаметр капли, мм	Конечная скорость падения капли, м/сек	Сила удара капли, рассчитанная по формуле (15) [11], кгс	Сила удара капли, рассчитанная по формуле в работе [14], кгс	Сила удара капли по экспериментальным данным [6], кгс
1	2,4	0,00029	0,00031	0,00098
	3,14	0,00038	0,00052	0,00128
	3,7	0,00045	0,00073	0,00147
2	4,1	0,0005	0,0009	0,0015
	2,8	0,00193	0,00167	0,0042
	3,8	0,00262	0,00308	0,0053
	5,2	0,00358	0,00577	0,008
3,2	5,9	0,00406	0,00743	0,0086
	3,15	0,00703	0,00543	0,011
	4,4	0,00981	0,01059	0,0167
	5,9	0,01316	0,01904	0,0228
	6,7	0,01494	0,02455	0,025
4	6,9	0,01539	0,02603	0,026
	3,3	0,01286	0,0093	0,018
	4,6	0,01794	0,01808	0,0283
	6,1	0,02377	0,03179	0,0365
	6,85	0,02669	0,04009	0,0413
	7,3	0,02844	0,04553	0,044
	7,5	0,02922	0,048059	0,0455

Как видно из таблицы, результаты соизмеримы, но формула (4) — дает более близкие к эксперименту результаты, чем формула (5). Наилучшее совпадение с экспериментальными данными достигается для конечных скоростей падения капель, близких к скоростям падения капель естественных осадков (последние цифры во втором столбце для скоростей и соответствующие цифры в четвертом столбце для силы удара, таблица). Таким образом, уравнение (4) можно рекомендовать для приближенных расчетов силы удара капель.

Чтобы перейти к давлению ( $P$ ), возникающему при ударе капли, необходимо знать площадь контакта ( $A$ ) капли с поверхностью в момент удара, которую трудно определить. В гидравлическом постановке задачи эта трудность избегается косвенным путем с помощью формулы (1) и аналогии с заторможенной струей [2]  $F\Delta t = PA\Delta t = cA\rho_k\Delta tV$ :

$$P = \rho_k c V, \quad (6)$$

где  $c$  — скорость волны торможения, равная скорости распространения звука в воде. Таким путем удастся избежать вычисления площади контакта.

В работе [15] приведен аналогичный вывод для давления, но вместо скорости  $c$  рассматривалась скорость  $V$ :

$$P = \rho_k V^2. \quad (7)$$

Это давление, по-видимому, соответствует некоторому среднему давлению за весь процесс удара. Более строго формула (6) выводится из уравнения состояния (адиабаты) и условий на фронте ударной волны в случае, когда угол между фронтом ударной волны и плоскостью соударения в точке их пересечения равен нулю ( $\alpha=0$ ) [9]. Но в этом выводе формулы (6)  $P$  — давление по периметру пятна контакта  $\rho_k$  — плотность и адиабатическая скорость звука в невозмущенной жидкости. Давление по периметру пятна контакта  $P$  растет с ростом  $\alpha$  (т. е. с увеличением площади пятна контакта) и достигает максимума в момент отрыва волны ( $\alpha=\alpha_{кр}$ ) [9].

В дальнейшем в гидродинамической постановке была численно решена нестационарная задача о прямом соударении цилиндрической

капли с жесткой поверхностью [3]. Результаты счета показали, что процесс удара носит волновой характер со сложным взаимодействием осевых и радикальных волн сжатия и разрежения, что приводит к возникновению обширных зон кавитации, способствующих разлету капли [3].

Предыдущее рассуждение справедливо для удара о твердые поверхности. Следует подчеркнуть, что сила и давление при ударе капель существенно зависят от характера поверхности, на которую они падают. Так, при ударе капель о почву нужно учитывать эффекты, обусловленные ее пористой, рыхлой структурой, которые в общем случае ослабляют удар по сравнению с ударом о твердую поверхность. Однако возможны случаи сжатия до больших давлений воздуха, заземленного в порах почвы. Без оценки ударного воздействия капель на поверхность почвы не может быть построена физическая теория капельно-дождевой эрозии. Все сказанное выше относится в основном к ударному воздействию на поверхность одиночных капель. Исследование реального дождя усложняется его спектром. Обзор исследований спектра капель в дождях в связи с изучением эрозии почв приведен в работах [4, 13].

Зная спектр и интенсивность осадков, а также формулы для вычисления кинетической энергии ( $E_k = \frac{\pi}{12} 10^{-6} d_k^3 V^2$ , где  $V$  — начальная скорость капли, м/сек;  $d_k$  — диаметр капли, мм;  $E_k$  — кинетическая энергия, дж), силы (2) — (5) и давления (6), (7) одиночной капли, можно рассчитать соответствующие суммарные характеристики для всего дождя. Например, можно рассчитать плотность потока кинетической энергии капель дождя в дж/м<sup>2</sup>·мин. Полезно строить совмещенные графики спектра и указанных капельно-ударных характеристик осадков. Это поможет выделить те части спектра, которые вносят незначительный вклад в ударное воздействие капель.

Очень осторожно следует относиться к результатам расчета капельно-ударных характеристик по некоторому среднему диаметру капель. Нужно строго оценивать расхождение результатов, полученных при известном спектре, с результатами, найденными по некоторому среднему диаметру капель. Здесь целесообразно говорить об эквивалентном по данной капельно-ударной характеристике однородном дожде, т. е. для каждого дождя с определенным спектром теоретически существует однородный дождь, состоящий из капель одного размера и имеющий такую же капельно-ударную характеристику, как и реальный дождь с определенным спектром.

Важно отметить, что одна и та же суммарная капельно-ударная характеристика может быть получена при различной комбинации капель в дожде, т. е. при различном спектре, а это значит, что различным будет и количество разбрызгиваемой почвы (капельно-дождевая эрозия). Поэтому, как отмечалось выше, необходимо определять количество разбрызгиваемой почвы в результате одного удара определенной капли и общее количество разбрызгиваемой почвы находить через суммирование по всем каплям. В решении этой трудной задачи может помочь экспериментальное моделирование, основанное на методах подобия и размерностей.

Если за прогнозный параметр взять количество разбрызгиваемой почвы в результате удара одной капли в единицах массы ( $Q$ ), а за определяющие параметры  $V$  — скорость капли перед ударом,  $d_k$  — диаметр капли,  $\rho_k$  — плотность воды,  $\eta$  — вязкость воды,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения воды,  $d_r$  — диаметр частиц почвы,  $\gamma$  — плотность твердой фазы почвы,  $C$  — сцепление почвенных частиц,  $g$  — ускорение силы тяжести, то с помощью анализа размерностей получим следующую формулу:

$$Q = \rho_k d_k^3 f \left( \text{Re}, \text{We}, \text{Fr}, \frac{d_r}{d_k}, \frac{\eta}{\rho_k V}, \frac{C}{\rho_k V^2} \right), \quad (8)$$

где  $\gamma_k = \rho_k g$ ,  $Re = \frac{\rho_k d_k V}{\eta}$  — число Рейнольдса,  $We = \frac{\rho_k d_k V^2}{\sigma}$  — число Вебера,  $Fr = \frac{V^2}{gd_k}$  — число Фруда.

Последний критерий подобия в формуле (8) характеризует соотношение сил сцепления и давления при ударе. Конкретный вид зависимости (8) может быть получен только с помощью эксперимента, которому будет принадлежать большая роль в построении физической теории капельно-дождевой эрозии.

#### Литература

1. Гаджев Г. Максимальная едрина и сила на удара на водните капки. Хидротехника и мелиорация, 1968, кн. 4.
2. Гегузин Я. Е. Капля. М., «Наука», 1977.
3. Гонор А. Л., Яковлев В. Я. Удар капли по твердой поверхности. Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 5.
4. Гудзон Н. Охрана почв и борьба с эрозией. М., «Колос», 1974.
5. Есин Н. В., Дмитриев В. Д. Эрозионное воздействие капель дождя и некоторые закономерности эволюции склонов. Геоморфология, 1975, № 4.
3. Листопад И. Е., Чижиков Г. И. К вопросу скорости капель искусственного дождя и силы их удара. Тракторы и с.-х. машины, 1970, № 10.
7. Матвеев Н. П. Методика составления карт энергии дождевых осадков и использование их в геоморфологическом анализе. Уч. зап. МОПИ, 1963, т. 124, вып. 10.
8. Мирцхулава Ц. Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М., «Колос», 1970.
9. Перельман Р. Г., Плинер Л. А. Определение давления на пятне контакта и его диаметра при каплеударном воздействии. Изв. вузов, Энергетика, 1975, № 5.
10. Сластухин В. В. Вопросы мелиорации склонов Молдавии, Кишинев, 1964.
11. Сластухин В. В. К расчету силы удара капли дождя. Проблемы географии Молдавии, вып. 6, 1971.
12. Сластухин В. В., Богданов Х. П. Эрозионная работа дождя и энергетическая характеристика естественных осадков. III делегат. съезд почвов. М., «Наука», 1968.
13. Швец Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л., 1974.
14. Bentley W. A. Studies in raindrops and raindrop phenomena. Monthly Weather Review, October, 1904.
15. Chadiri H., Payne D. Raindrop impact stress and the break-down of soil crumbs. J. Soil. Sci., v. 28, № 2, 1977.
16. Cheng Lung. Dynamic spreading of drops impacting on to a solid surface. Ind. and Engng. Chem. Proc. Des. and Develop., v. 16, № 2, 1977.
17. Ekern P. C. Raindrop impact as the force initiating soil erosion. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., v. 15, 1950.
18. Ekern P. C. Problem of raindrop impact erosion. Agric. Engng, January, 1953.
19. Ellison W. D. Studies of raindrop erosion. Agric. Engng; v. 25, № 4, 1944.
20. Ellison W. D. Soil detachment and transportation. Soil Conserv. Mag. Feb., v. 23, № 1, 1946.
21. Lenard P. Ueber Regen Met. Zs., v. 21, № 5, 1904.
22. Lows J. O. Recent studies in raindrops and erosion. Agric. Engng, v. 31, 1940.
23. Lows J. O. Measurements of fall-velocity of waterdrops and raindrops. Trans. Amer. Geophys. Union, v. 22, 1941.
24. Macklin W. C., Mataxas G. J. Splashing of drops on liquid layers. Appl. Phys., v. 47, № 9, 1976.

Факультет почвоведения  
МГУ

Дата поступления  
6.IV.1979 г.

V. M. MOSKOVKIN, V. F. GAKHOV

#### PHYSICAL ASPECTS OF DROPPING-RAIN EROSION

Two main aspects of dropping-rain erosion are analysed: the breakdown of soil structure and the translocation of soil by splashing. Measures for the elimination of these phenomena are suggested. Calculations of the force and pressure exerted by a drop, when it strokes the soil surface, are presented. By means of the dimensional method similarity criteria have been obtained for the process of drop-stroke action.