

УДК 502/504:631.6.02:620.193.15

М. С. ЗВЕРЬКОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРА КАПЛИ
О ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

Явление удара капли о твердую поверхность тесно связано со многими фундаментальными научными проблемами, а также с такими прикладными задачами, как явления эрозии материалов, грунтов и почв. В рамках федеральной целевой программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» одной из важнейших задач является охрана земель от эрозии. Предусматривается существенное повышение экологической составляющей мелиоративных мероприятий за счет использования природоохранных технологий и технических средств в мелиорации. Поэтому актуальным становится вопрос разработки и исследований оперативных способов контроля показателей эрозии, в частности разрушения почв под воздействием капель искусственного дождя. В статье рассматривается процесс свободного падения капли в газовой среде. Исследованы капли диаметром 1,73, 1,96, 2,32 и 3,0 мм, диапазон скоростей которых составил исследуемых капель составл 4,4...6,99 м/с. Установлено, что скорости не зависят от диаметра капель ($p < 0,05$, коэффициент корреляции $r = 0,001$) и зависят от высоты падения. Время удара составило $5,6...6,9 \cdot 10^{-5}$ с, сила удара – 0,18...1,15 Н. Проведен анализ зависимостей для расчета силы удара капли. Результаты экспериментов сопоставлены с литературными данными. Показано, что с помощью устройства для измерения динамического действия дождя возможно получение более точных значений времени. Точность определения силы гидродинамического удара капли с помощью данного устройства возрастает в 4,5...8,9 раз.

Удар капли, гидродинамический удар, капельная эрозия, диаметр капли, скорость, сила удара, поверхностное натяжение, энергия, гидрофильная поверхность.

The phenomenon of drop falling on solid surface is closely connected with many fundamental scientific problems as well as such applied tasks as phenomena of erosion of materials, grounds and soils. Within the frame of the target program «Development of agriculture and regulation of markets of agricultural produce, raw material and foodstuff for 2013–2020» one of the most important tasks is land protection from erosion. A significantly higher ecological constituent of land reclamation measures due to usage of environmental technologies and technical means in reclamation is provided. Therefore development and investigations of efficient methods of erosion indices control is becoming an actual question, in particular, soil destruction under the influence of artificial rain drops. The article considers a process of a drop free falling in the gaseous medium. There are investigated drops of diameter 1,73, 1,96, 2,32 u 3,0 mm, the range of their speeds was 4,4...6,99 m/s. It is established that speeds do not depend on the diameter of drops ($p < 0,05$, coefficient of correlation $r = 0,001$) and depend on the height of falling. The time of impact was $5,6...6,9 \cdot 10^{-5}$ s, impact force – 0,18...1,15 Н. The analysis of dependencies was performed for estimation of the drop impact force. The results of the experiments were compared with literary data. It is shown that by means of the device for measuring a dynamic action of rain it is possible to receive more exact values of time. The accuracy of force determination of drop hydraulic impact by means of this device increases by 4,5...8,9 times.

Drop impact, hydrodynamic impact, drop erosion, drop diameter, speed, force of impact, surface tension, energy, hydrophilic surface.

Явление удара капли о твердую поверхность тесно связано со многими фундаментальными научными проблемами, а также с такими прикладными задачами, как явления эрозии материалов, грунтов и почв.

В рамках федеральной целевой программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы» к первому уровню приоритетов относится мелиорация земель сельскохозяйственного назначения и повышение плодородия почв. При этом одной из важнейших задач является охрана земель от эрозии. Предусматривается существенное повышение экологической составляющей мелиоративных мероприятий за счет использования природоохранных технологий и технических средств в мелиорации. Поэтому актуальным становится вопрос разработки и исследований оперативных способов контроля показателей эрозии, в частности разрушения почв под воздействием капель искусственного дождя.

Процесс свободного падения в газовой среде капли массой m с начальной скоростью v_0 и высоты h от твердой поверхности показан на рис. 1. На высоте h капля обладает кинетической $E_{k,0} = m \cdot v_0^2 / 2$ и потенциальной энергией $E_p = mgh$, где g – ускорение свободного падения, м/с²:

$$E_{k,0} + E_p = \text{const.} \quad (1)$$

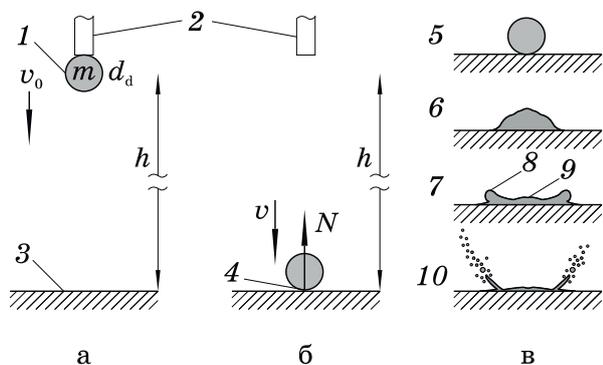


Рис. 1. Схема падения (а), удара (б) и разбрызгивания (в) капли: 1 – капля; 2 – инжектор; 3 – контактная поверхность; 4 – передняя кромка капли; 5 – момент удара; 6 – процесс распространения в капле ударной волны; 7 – растекание капли; 8 – деформация свободной поверхности; 9 – образование ламеллы; 10 – образование «коронки» и разрушение капли

При ударе капли о твердую поверхность от границы контакта в противополо-

жном направлении начинает распространяться ударная волна, вызывающая колебания внутри жидкости. Дальнейшее распространение ударной волны вызывает деформацию свободной поверхности и образуется тонкая ламелла. Сжатие капли становится максимальным, происходит разрушение капли с образованием «коронки» (рис. 2).



Рис. 2. Образование «коронки» (Bisher Imam, The University of Arizona, США)

В данной работе приняты следующие допущения. Как и в исследованиях других авторов, удар и перемещение капли регистрировались по передней кромке 4 в направлении ее движения. Эта особенность отмечается в [1] и может давать отличие результатов аппроксимации по данным, полученным при изучении перемещения капли относительно центра массы. Контактная поверхность 3 должна быть гидрофильной и скорости падения – намного меньше скоростей звука в жидкости, в противном случае в момент удара произойдет «отскок» капли. Для образования капель использовали иглы (инъекторы) с внутренним диаметром 0,060 (34G); 0,110 (32G); 0,410 (22G) и 0,603 (20G) мм; были получены капли диаметром 1,73, 1,96, 2,32 и 3,0 мм соответственно. Капли падали с высоты h 1,0, 1,5, 2,0 и 2,5 м. Рабочая жидкость – дистиллированная вода (ГОСТ 6709–72), температура 20 °С, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0,07286$ Н/м, плотность 998,203 кг/м³. Температура лабораторного помещения 21 °С, относительная влажность воздуха 53 %. Для упрощения расчетов принято, что капля имеет форму шара с диаметром d_a , тогда:

$$m = (\pi/6)\rho d_a^3,$$

где ρ – плотность капли, кг/м³.

Поверхность капли, граничащая с газовой средой, также обладает энергией, называемой энергией поверхностного натяжения E_{st} , рассчитываемой так:

$$E_{st} = \frac{dF}{dS} \cdot S = \sigma \cdot S,$$

где F – сила поверхностного натяжения, Н; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; S – площадь поверхности капли, м².

В момент удара о твердую поверхность происходит «дробление» и разбрызгивание капли, то есть происходит уменьшение площади поверхности S и совершается работа по перемещению жидкости (рис. 1в). Потенциальная энергия капли переходит в энергию поверхностного натяжения:

$$E_k + E_{st} = \text{const}, \quad (2)$$

где E_k – кинетическая энергия капли в момент удара, Дж.

Начальная скорость падения капли (в момент отрыва от инжектора) равна нулю. Скорость истечения, то есть скорость образования капель, может быть определена по формуле Торричелли. Однако в условиях эксперимента эта скорость не равна v_0 . В момент образования капля еще некоторое время ввиду действия сил поверхностного натяжения находится на конечном участке инжектора 2 (рис. 1а). Отрыв происходит, когда F равна весу капли. При ударе капля обладает импульсом, скорость изменения которого согласно второму закону Ньютона пропорциональна силе N удара капли о твердую поверхность:

$$mv = Nt, \quad (3)$$

где v – скорость капли в момент удара, м/с; t – время гидродинамического удара о твердую поверхность, с.

Совместное решение (1)–(3) позволяет найти силу N :

$$N = \frac{\pi r d_d^3 \sqrt{2(gh - 6\sigma / (\rho \cdot d_d))}}{6t}. \quad (4)$$

Время удара может быть определено по зависимости $t = d_d/v$, в предположении, что верхняя точка капли в момент удара перемещается к точке соприкосновения с твердой поверхностью со скоростью v [2]. Время удара можно определить и с помощью устройства для измерения динамического действия дождя на почву, описанного в [3, 4]. В исследованиях [5] установлено, что при $v = 20...230$ см/с время контакта не зависит от скорости удара и вязкости жидкости, хотя деформация зависит от t . В

работе [6] отмечается, что для диапазона скоростей 5...20 см/с t удваивается и зависит от v .

Известны менее сложные зависимости расчета N . В статье [7] В. М. Московкин и В. Ф. Гахов установили, что чем большей конечной скоростью обладает капля, тем большее воздействие она оказывает на контактную поверхность (почву). Причем это воздействие больше у капель большего диаметра:

$$N = \frac{\pi}{6} \rho d_d^2 v^2. \quad (5)$$

А. С. Imeson, R. Vis и E. de Water в работе [8] получили следующую зависимость для расчета силы удара капли от ее радиуса r_d , которая после соответствующих преобразований аналогична формуле (5):

$$N = \frac{mv^2}{2r_d} = \frac{\pi}{6} \rho d_d^2 v^2. \quad (6)$$

Экспериментальные и численные исследования зависимости (6) описаны также в [9].

Автором статьи проведен анализ зависимостей (4)–(6). Повторность опыта пятикратная. Изучение проводили по стандартным методикам лабораторных опытов. Математическая обработка результатов опытов выполнена в программном комплексе «Statistica 10.0». Принятый уровень значимости $p < 0,05$. Время удара устанавливалось расчетом по зависимости $t = d_d/v$ из [2] и с помощью устройства для измерения динамического действия дождя на почву из [3, 4]. Схема и описание лабораторной установки приведена в [4].

Диапазон скоростей для исследуемых капель составил 4,4...6,99 м/с. При этом v не зависит от d_d ($p < 0,05$, коэффициент корреляции $r = 0,001$) и зависит от h ($p < 0,05$, $r = 0,98$).

Время удара капли, рассчитанное по зависимости $t = d_d/v$, оказалось больше измеренного с помощью устройства и составило $2,5...6,2 \cdot 10^{-4}$ с и $5,6...6,9 \cdot 10^{-5}$ с соответственно.

Сила удара капель по зависимости (4) и при $t = d_d/v$ составила 0,03...0,19 Н, по (4) при измеренном t с помощью устройства – 0,18...1,15 Н, по (5) и (6) – 0,03...0,19 Н. Для (4) при $t = d_d/v$ и (5)–(6) получены

одинаковые результаты. Это свидетельствует о том, что зависимости (4)–(6) отражают одну и ту же закономерность. Однако при расчетах по зависимости (4) при измеренном t величины F отличаются от результатов по (4) при $t = d_d/v$ и (5)–(6) в 4,5...8,9 раз.

Результаты экспериментов для капель с диаметрами 1,73 и 2,73 мм приведены на рис. 3.

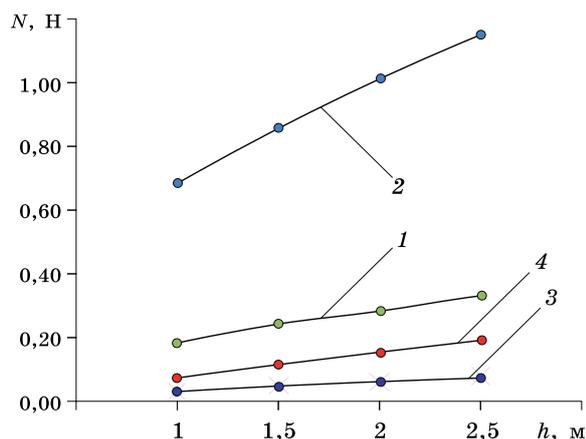


Рис. 3. Результаты эксперимента: 1 и 2 – расчеты по зависимости (4) при измеренном t для капель $d_d = 1,73$ и $2,73$ мм соответственно; 3 и 4 – по (4)–(6) при $t = d_d/v$ для $d_d = 1,73$ и $2,73$ мм соответственно

Актуальным остается вопрос изучения удара капли о почву. Капля одновременно впитывается в ее поры и разрушает агрегаты. В процессе вязкой диссипации почвенные частицы вместе с разрушенной каплей разбрызгиваются по поверхности (рис. 4).



Рис. 4. Фотографии удара капли в песок (Devaraj van der Meer, the University of Twente, Нидерланды)

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости более тщательного определения времени удара капли. С помо-

щью устройства для измерения динамического действия дождя возможно получение более точных значений времени. Данные экспериментов позволяют расширить спектр применения этого прибора. С использованием зависимости (4) возможно исследование давления, возникающего в момент удара капли о твердые поверхности. Необходимо дополнительно изучить возможность применения этой зависимости для анализа удара капель о почву.

1. Бойко В. М., Поплавский С. В. Особенности динамики капли воды в потоке за ударной волной // Известия РАН. Физика жидкости и газа. – 2007. – № 3. – С. 110–120.

2. Гегузин Я. Е. Капля. – М.: Наука, 1977. – 134 с.

3. Касьянов А. Е., Зверьков М. С. Оборудование для контроля эрозионной опасности дождя // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 13–16.

4. Зверьков М. С. Акустические маркеры крупности капель искусственного дождя // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 19–21.

5. Richard D., Clanet C., Quere D. Contact time of a bouncing drop // Nature. – 2002. – Vol. 417. – P. 811.

6. Oscillation of liquid drops under gravity: Influence of shape on the resonance frequency / M. Perez and [et al.] // Europhysics Letters. – 1999. – Vol. 47. – P. 189–195.

7. Московкин В. М., Гахов В. Ф. Физические аспекты капельно-дождевой эрозии // Почвоведение. – 1979. – № 12. – С. 76–80.

8. Imeson A. C., Vis R., Water de E. The measurement of water drop impact forces with piezoelectric transducer // Catena. – 1981. – Vol. 8. – P. 83–96.

9. Nearing M. A., Bradford J. M., Holtz R. D. Measurement of force vs. time relations for waterdrop impact // Soil Science Society of America Journal. – 1986. – Vol. 50. – P. 1532–1536.

Материал поступил в редакцию 15.01.15.

Зверьков Михаил Сергеевич, ассистент
E-mail: mzverkov@bk.ru