

С. В. БРЫЛЬ

Коломенский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», г. Коломна

М. С. ЗВЕРЬКОВ

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

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭФФЕКТИВНОЕ ДАВЛЕНИЕ УДАРА КАПЛИ О ПОЧВУ

В статье рассматривается вопрос расчета давления капли о почву. Отмечается, что определение давления в результате удара капель дождя необходимо для лучшего понимания механизма разбрызгивания почвы при капельной эрозии. Приводятся зависимости для расчета давлений, возникающих при ударе капли о почву в твердой и жидкой фазах. Используется методика определения вертикального эффективного давления, описанная в работе М. А. Nearing (1995). Для определения времени и параметров удара капли применяется специально разработанное и запатентованное устройство. Получены значения вертикального эффективного давления для капли диаметром 1,73 мм, которые находятся в пределе 193,54...285,36 кПа, для капли 2,73 мм – 197,16...295,80 кПа. Давление, соответствующее гидравлическому удару, для капли диаметром 1,73 мм должны были составить 6505,84...10326,90 кПа, для капли 2,73 мм – 6521,40 кПа...10336,70 кПа. С помощью запатентованного устройства для акустического исследования установлено время t удара капли о почву. Оно составило $7,8...8 \cdot 10^{-5}$ с. Удар длится сотысячные доли секунды, но из-за малой площади контакта капля оказывает большее давление на почву. Числа Вебера We для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределе 459...1156, для капли 2,73 мм – 728...1829. Выполняется условие $We \gg 1$, то есть деформация капли при ударе максимальная, в результате чего происходит ее разрушение, которое заканчивается процессом разбрызгивания.

Капельная эрозия, капля, удар капли, вертикальное эффективное давление, разбрызгивание почвы.

Введение. Определение давления в результате удара капель дождя необходимо для лучшего понимания механизма разбрызгивания почвы при капельной эрозии. Результаты экспериментов, полученные разными авторами, изменяются в широком диапазоне, так как исследователи применяют непохожие методики для описания этого процесса. При ударе капли о почву возникают две ударные волны – в твердой и жидкой фазах, что детально описано в работе М. А. Nearing ([1], 1995).

Процесс свободного падения в газовой среде капли массой m с начальной скоростью v_0 и высоты h от твердой поверхности показан на рисунке 1 [2]. На высоте h капля обладает кинетической $E_{k,0}$ и потенциальной энергией E_p :

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

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. 1, в). Потенциальная энергия капли переходит в

энергию поверхностного натяжения E_{st} :

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

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

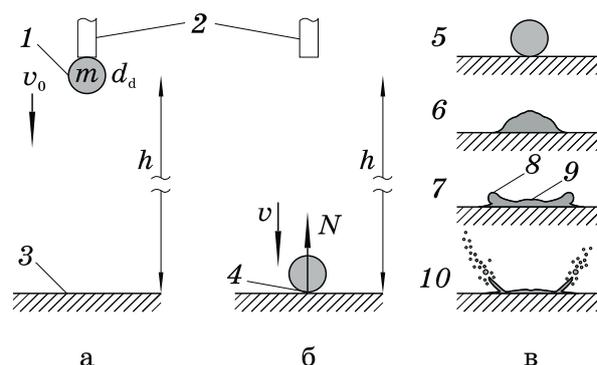


Рис. 1. Схема падения (а), удара (б) и разбрызгивания (в) капли [2]: 1 – капля; 2 – иньектор; 3 – контактная поверхность; 4 – передняя кромка капли; 5 – момент удара; 6 – процесс распространения в капле ударной волны; 7 – растекание капли; 8 – деформация свободной поверхности; 9 – образование ламеллы;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

Как отмечает М. А. Nearing [1], для понимания механики процесса разбрызгивания и деформации почвы при капельной эрозии важно знать вертикальное эффективное давление p_e , которое можно определить по зависимости:

$$p_e = p_f - p_p, \quad (3)$$

где p_f – полное давление, оказываемое каплей на почвенный скелет (в твердой фазе); p_p – полное давление в поровой влаге (в жидкой фазе).

Известен ряд решений [1, 5–7], [18] определения давления удара капли о твердые поверхности с помощью зависимости для гидравлического удара:

$$p = \rho c v, \quad (4)$$

где c – скорость звука в воде, $c = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – скорость капли в момент удара, м/с.

Формула (4) дает приближенное значение величины p . Строгое гидромеханическое решение этой задачи учитывает кумулятивный эффект волн давления, возникающих в капле в начальной фазе удара о твердую поверхность. Оно представлено в дифференциальном виде и требует применения численных методов расчета [3]. В момент удара о поверхность, в том числе о поверхность почвы, капля ведет себя как твердое тело. Однако, как подтверждают многочисленные исследования зарубежных ученых, продолжительность действия давления на почву в этот момент настолько короткое, что оно не влияет на эрозию [4]. В ранних исследованиях этого процесса показано сходство с эффектом гидравлического удара воздействия капель на твердые поверхности [5], [6], [7], [18].

Во второй фазе удара давление в капле резко падает, и она растекается по поверхности. Причем распределение давлений симметрично относительно точки удара [8, 9]. В экспериментах американских ученых установлено, что максимальное давление на почву приходится на некотором расстоянии от точки удара. Похожие результаты имели место в исследованиях с твердыми поверхностями, однако давление на почву было намного меньше [1, 8, 10]. Так максимальное давление удара о почву в эксперименте М. А. Nearing от падения 5,6 мм капли с высоты 14 м на некотором расстоянии (сопоставимым с размерами капли) от точки удара составило порядка 400 кПа, а в соответствии с приведенными им графическими данными вблизи удара давление

в этих условиях составило 100 кПа [1, 11].

При ударе капли о твердую поверхность от границы контакта (в зоне которой капля возникает лобовое давление) в противоположном направлении начинается распространяться ударная волна, вызывающая колебания внутри жидкости. Отношение лобового давления жидкости к давлению внутри капли (обусловленного поверхностным натяжением) описывается числом Вебера:

$$We = \frac{\rho v^2 d_d}{\sigma}, \quad (5)$$

где v – скорость капли, м/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Дальнейшее распространение ударной волны вызывает деформацию свободной поверхности и образуется тонкая ламелла (рис. 1, стадии 7–8–9). Сжатие капли становится максимальным, происходит разрушение капли с образованием «коронки». Максимальная деформация капли возможна при $We \gg 1$.

Цель исследования заключалась в том, чтобы изучить возможность вычисления эффективного давления капли на почву по параметрам, определяемым с помощью запатентованного устройства [12, 13] и сравнить полученные результаты с описанной М. А. Nearing методикой в [1]. Акустический способ определения времени удара t и силы удара N капли диаметром d_d с помощью устройства [12] описан в работе [2].

Материал и методы. Исследования проводили на установке, показанной на рисунке 2 [14]. 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 [2] 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) и 0,603 (20G) мм; были получены капли диаметром 1,73 и 2,73 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_d .

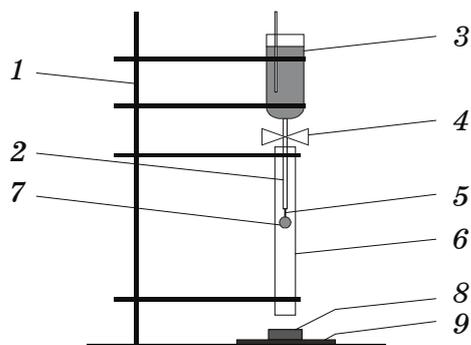


Рис. 2. Схема лабораторной установки: 1 – штатив; 2 – трубка; 3 – сосуд Мариотта; 4 – вентиль; 5 – инъектор; 6 – защитный кожух; 7 – капля; 8 – почвенный образец; 9 – мишень

В [1] М. А. Nearing описывает методику для расчета вертикального эффективного давления p_e с помощью зависимости (3). Полное давление p_f , оказываемое каплей на почвенный скелет (в твердой фазе) определяется по выражению:

$$p_f = \rho c / [\beta_f + \beta_p (\rho_p U_p / \rho_f U_f) + \rho c / \rho_f U_f], \quad (6)$$

где β_f и β_p – часть почвы, в которую проникает волна соответственно по твердой фазе почвы и по поровой жидкости; ρ_f и ρ_p – плотность соответственно материала, перемещаемого волной в скелетной части почвы, и материала, перемещаемого волной в поровой жидкости, кг/см³; U_f и U_p – скорость волны соответственно в скелете почвы и поровой жидкости, м/с [1].

Полное давление p_p в поровой влаге (в жидкой фазе) определяется так:

$$p_p = \rho c / [\beta_p + \beta_f (\rho_f U_f / \rho_p U_p) + \rho c / \rho_p U_p], \quad (7)$$

Методика определения параметров, входящих в зависимости (6) и (7), описана в [1].

Также рассчитывалось значение давления p для гидравлического удара по зависимости (4).

Исследовались образцы почвы из орошаемого фермерского хозяйства «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.», расположенного в Коломенском районе Московской области. Это аллювиальная агроотемно-

гумусовая глееватая супесчаная почва (профиль: PU–AUG–Cg²–Csa, плотность 1250 кг/м³, плотность скелета 2420 кг/м³). Наименование горизонтов давалось по методике Почвенного института имени В. В. Докучаева [15].

Результаты и обсуждение. Результаты расчетов показаны на рисунке 3.

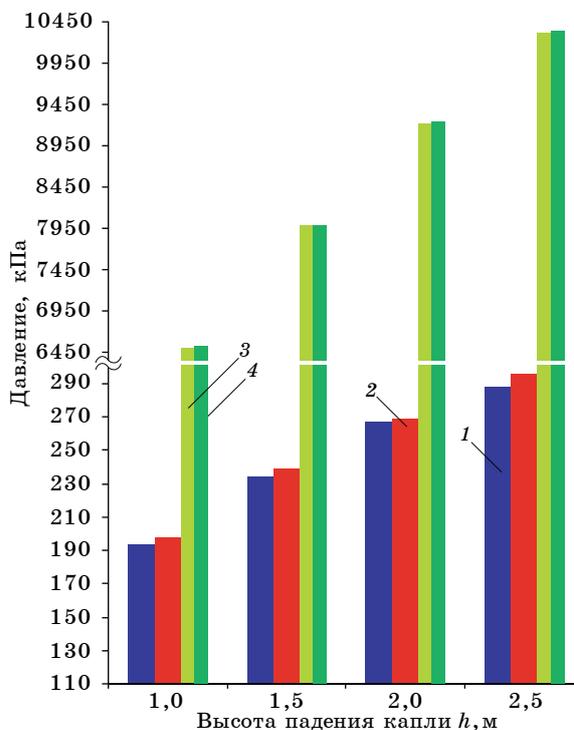


Рис. 3. Результаты расчетов давления удара капли о почву: 1 – капля диаметром 1,73 мм, давление p_e по формуле (3); 2 – капля диаметром 2,73 мм, давление p_e по формуле (3); 3 – капля диаметром 1,73 мм, давление p по формуле (4); 4 – капля диаметром 2,73 мм, давление p по формуле (4)

Значения эффективного давления p_e по формуле (3) для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределе 193,54...285,36 кПа, для капли 2,73 мм – 197,16...295,80 кПа. Давления p по зависимости (4), соответствующие гидравлическому удару, составили бы для капли диаметром 1,73 мм – 6505,84...10326,90 кПа, для капли 2,73 мм – 6521,40 кПа...10336,70 кПа.

Полученные результаты сравнимы с данными М. А. Nearing. В работе [1] с использованием разработанной им методики расчета эффективного давления p_e по формуле (3) и специально разработанного пьезоэлектрического датчика для

капли 5,6 мм, падавших с высоты 14 м, на суглинистую почву плотностью 1200 кг/м³ получено максимальное значение давления 400 кПа. При этом исследователь отмечает, что давление гидравлического удара должно было составить для описанных условий прядка 14000 кПа.

С помощью прибора установлено время t удара капли о почву. Оно составляет $7,8...8 \cdot 10^{-5}$ с. Время удара очень короткое, но из-за малых размеров и площади контакта капля оказывает большее давление на почву.

Числа Вебера We для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределе 459...1156, для капли 2,73 мм – 728...1829. Как видно, выполняется условие $We \gg 1$, то есть деформация капли при ударе максимальная, в результате чего происходит ее разрушение, которое заканчивается процессом разбрызгивания (рис. 1).

Выводы

В результате исследований удалось получить данные, сравнимые с экспериментами других исследователей. Авторы статьи отмечают сложность определения специальных параметров, входящих в зависимости (3), (6), (7). Эта особенность ограничивает применение методики [1] только условиями эксперимента.

Перспективным является развитие методики определения эффективно-вертикального давления для расчета водосберегающих режимов искусственного дождевания. Методики расчета водосберегающих режимов и их параметров описаны в [16], [17].

Библиографический список

1. Nearing M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff // *Eurasian soil science*. – 1997. – Vol. 30. – № 5. – P. 552–556.
2. Зверьков М. С. Численные исследования удара капли о твердую поверхность // *Природообустройство*. – 2015. – № 2. – С. 17–20.
3. Чижов А. В., Шмидт А. А. Взаимодействие капли жидкости с твердой поверхностью // *Письма в Журнал Технической Физики*. – 1996. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 57–63.
4. Ghadiri H. Raindrop impact and splash erosion // *Encyclopedia of soil science*. – 2006. – P. 1428–1432.

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

6. Касьянов А. Е. Баллистика капельной эрозии почв // *Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем: материалы Международной научно-практической конференции*. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – С. 210–215.

7. Alder W. F. The mechanics of liquid impact: Treatise on Material Science and Technology. – N. Y.: Preece, C. M., Ed.; Academic Press. – 1979. – Vol. 16. – P. 127–183.

8. Huang C., Bradford J. M., Cushman J. H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case // *Soil Science Society of America Journal*. – 1982. – Vol. 46. – P. 14–19.

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

10. Hwang J. B. G., Hammitt F. G. High-speed impact between curved liquid surface and rigid flat surface // *Journal Fluids Engineering*. – 1977. – Vol. 99. – P. 346–404.

11. Nearing M. A., Bradford J. M., Holtz R. D. Measurement of waterdrop impact pressures on soil surfaces // *Soil Science Society of America Journal*. – 1987. – Vol. 51. – P. 1302–1306.

12. Устройство для измерения динамического действия дождя на почву: Пат. 155056 (Российская Федерация, МПК G 01 N 33/24, A 01 G 25/00 / Авторы, заявители и патентообладатели: А. Е. Касьянов, М. С. Зверьков. – № 2015107899; заявл. 05.03.2015; опубл. 20.09.2015. – Бюл. № 26. – 1 с.

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

14. Зверьков М. С. Капельная эрозия как фактор нарушения плодородия почв орошаемых агроландшафтов // *Природообустройство*. – 2013. – № 5. – С. 31–34.

15. Полевой определитель почв. – М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. – 182 с.

16. Брыль С. В. Оценка природной теплового обеспечения агроландшафтов Московской области // *Экология и строительство*. – 2015. – № 3. – С. 26–30.

17. Брыль С. В. Режимы орошения и минерального питания при выращивании

моркови // Экология и строительство. – 2015. – № 4. – С. 18–21.

18. **Брыль С. В., Зверьков М. С.** Теоретические подходы к расчету вертикального эффективного давления удара капель искусственного дождя о почву и твердую поверхность // Экология и строительство. – 2016. – № 1. – С. 16–20.

Материал поступил в редакцию 25.01.2016.

Сведения об авторах

Брыль Сергей Валерьевич, кандидат

технических наук, заведующий кафедрой строительного производства; Коломенский институт (филиал) Университета машиностроения; 140402, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 408; e-mail: stroy@kimami.ru.

Зверьков Михаил Сергеевич, ассистент кафедры мелиорации и рекультивации земель; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44; e-mail: mzverkov@bk.ru.

S. V. BRYL

Kolomna Institute of Moscow State Technical University «MAMI», Kolomna

M. S. ZVERKOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

VERTICAL EFFECTIVE PRESSURE OF DROP IMPACT ON SOIL

The article considers a problem of calculation of drop pressure on soil. It is noted that estimation of pressure as a result of raindrops impact is necessary for a better understanding of the mechanism of soil splashing under drop erosion. There are given dependencies for calculation of pressures arising at the raindrop blow on the soil in liquid and firm phases. The method is used for determination of the vertical effective pressure described in the work of M. A. Nearing (1995). For determination of time and parameters of drop impact there is used a specially developed and patented device. There are obtained values of vertical effective pressure for a drop of diameter 1.73 mm which are in the range of 193.54...285.36 kPa, for a drop 2.73 mm – 197.16...295.80 kPa. The pressure corresponding to the hydraulic impact, for a drop 1.73 mm should be 6505.84...10326.90 kPa, for a drop 2.73 mm – 6521.40 kPa...10336.70 kPa. By means of the patented device for an acoustic research there is established the time t of drop impact on soil. It is $7.8...8 \cdot 10^{-5}$ s. The blow lasts one hundred-thousands fractions of a second, but due to a small contact area the drop exerts more pressure on soil. Weber numbers We for a drop of diameter 1.73 mm are in the range of 459...1156, for a drop 2.73 mm – 728...1829. The condition $We \gg 1$ is fulfilled that is drop deformation under impact is maximal which results in its breakage which ends with a process of splashing.

Drop erosion, drop, drop impact, vertical effective pressure, soil splashing.

References

1. **Nearing M. A.** The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff // Eurasian soil science. – 1997. – Vol. 30. – № 5. – P. 552–556.
2. **Zverkov M. S.** Chislennye issledovaniya udara kapli o tverduyu poverhnostj // Prirodoobustrojstvo. – 2015. – № 2. – S. 17–20.
3. **Chizhov A.V., Shmidt A.A.** Vzaimodejstvie kapli zhidkosti s tverdoj poverhnostjyu // Pisjma v Zhurnal Tehnicheskoj Fiziki. – 1996. – V. 22. – Vyp. 3. – S. 57–63.
4. **Ghadiri H.** Raindrop impact and splash erosion // Encyclopedia of soil science. – 2006. – P. 1428–1432.
5. **Geguzin Ya. E.** Kaplya. – M.: Nauka, 1977. – 134 s.
6. **Kasjanov A.E.** Ballistika kapelnoj erozii pochv // Problemy kompleksnogo obustrojstva tehnoprirodnih system: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii. – M.: FGBOU VPO MGUP, 2013. – S. 210–215.
7. **Alder W. F.** The mechanics of liquid impact: Treatise on Material Science and Technology. – N. Y.: Preece, C. M., Ed.; Academic Press. – 1979. – Vol. 16. – P. 127–183.
8. **Huang C., Bradford J. M., Cushman**

J. H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case // *Soil Science Society of America Journal*. – 1982. – Vol. 46. – P. 14–19.

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

10. **Hwang J. B. G., Hammitt F. G.** High-speed impact between curved liquid surface and rigid flat surface // *Journal Fluids Engineering*. – 1977. – Vol. 99. – P. 346–404.

11. **Nearing M. A., Bradford J. M., Holtz R. D.** Measurement of waterdrop impact pressures on soil surfaces // *Soil Science Society of America Journal*. – 1987. – Vol. 51. – P. 1302–1306.

12. **Ustrojstvo dlya izmereniya dinamicheskogo deistviya dozhdya na pochvu: Pat. 155056 (Rossijskaya Federatsiya MPK G 01 N33/24, A 01 G 25/00 / Avtory, zayaviteli i patentoobladateli: A. E. Kasjanov, M. S. Zverkov. – № 2015107899; zayavl. 05.03.2015; opubl. 20.09.2015. – Bul. № 26. – 1 s.**

13. **Zverkov M. S.** Akusticheskiye marker krupnosti kapelj iskusstvennogo dozhdya // *Prirodobustrojstvo*. – 2014. – № 5. – S. 19–21.

14. **Zverkov M. S.** Kapeljnaya eroziya kak factor narusheniya plodorodiya pochv oroshaemyh agrolandshaftov // *Prirodobustrojstvo*. – 2013. – № 5. – S. 31–34.

15. **Polevoj opredelitelj pochv. – M.: Pochvenny in-t im V.V. Dokuchaeva, 2008. – 182 s.**

16. **Bryl S. V.** Otsenka prirodnoj teplo-

vlagobespechennosti agrolandshaftov Moskovskoj oblasti // *Ecologiya i stroiteljstvo*. – 2015. – № 3. – S. 26–30.

17. **Bryl S. V.** Rezhimy orosheniya i mineraljnogo pitaniya pri vyrashchivaniya morkovi // *Ecologiya i stroiteljstvo*. – 2015. – № 4. – S. 18–21.

18. **Bryl S. V., Zverkov M. S.** Teoreticheskie podhody k raschetu vertikaljnogo effektivnogo davleniya udara kapelj iskusstvennogo dozhdya o pochvu i tverduyu poverkhnostj // *Ecologiya & stroiteljstvo*. – 2016. – № 1. – S. 16–20.

Received on 25.01.2016.

Information about the authors

Bryl Sergey Valerjevich, candidate of technical sciences, head of the chair of construction production; The Kolomna institute (branch) of the University of machine building; 140402, Moscow region, town Kolomna, ul. Oktyabrjskoy revolutsii, 408; e-mail: stroy@kimami.ru.

Zverkov Mikhail Sergeevich, assistant of the chair of land reclamation and recultivation; FSBEI HERSAU-MAA named after C. A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Academichaskaya, 44; e-mail: mzverkov@bk.ru.