

Information about the authors

Belolyubtsev Alexander Ivanovich, doctor of agricultural sciences, head of the department of meteorology and climatology, FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 12; e-mail: belolyubtsev@mail.ru

Dronova Elena Aleksandrovna, candidate of geographical and geological Sciences, associate professor of the department of meteorology and climatology, FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 12; e-mail: helena_dronova@mail.ru

УДК 502/504 : 631.6.02 : 620.193.15

DOI 10.26897/1997-6011/2018-5-82-87

М.С. ЗВЕРЬКОВ^{1, 2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экологии и строительства», г. Коломна, Российская Федерация

ПРЕДЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ ПРИ УДАРЕ О НЕЕ КАПЛИ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ

Цель исследования заключается в разработке методики определения условия предельного напряженного состояния почвы при ударе о нее капли искусственного дождя. При ударе капля дождя в почве возникают напряжения, называемые вертикальным эффективным давлением. В соответствии с теорией Мора-Кулона построены круги напряжений Мора. Для случая удара капли диаметром 1,73 мм о почву касательное напряжение составило $85,57 \pm 2,99$ кПа (критерий Стьюдента $t_e = 21,27$ и уровень значимости $p < 0,001$) при падении капль с высоты 2,5 м. Для случая удара о почву капль диаметром 2,73 мм сдвиг составил $101,06 \pm 8,91$ кПа ($t_e = 8,93$ и $p < 0,001$) при падении капль с высоты 2,5 м. Аналогичным образом были построены круги Мора для всех исследуемых касательных напряжений. Результаты расчета значений нейтральных напряжений (в жидкой фазе почвы) для удара капль диаметром 1,73 мм о почву находятся в диапазоне от $-5,57 \pm 0,47$ кПа ($t_e = 57,70$ и $p < 0,001$) до $-10,32 \pm 0,72$ кПа ($t_e = 62,22$ и $p < 0,001$) при падении капль с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Для случая удара о почву капль диаметром 2,73 мм величины нейтральных напряжений представлены параметрами от $-7,03 \pm 0,37$ кПа ($t_e = 88,63$ и $p < 0,001$) до $-12,55 \pm 2,16$ кПа ($t_e = 24,72$ и $p < 0,001$) при падении капль с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Полученные в статье данные подтверждаются результатами исследований разбрызгивания почвы при капельной эрозии.

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

Введение. При выпадении на почву любого (искусственного и естественного) дождя впитывающая способность почвы со временем уменьшается по следующим причинам. Во-первых, происходит постепенное возрастание влажности почвы. Во-вторых, (одновременно с увеличением влажности) от ударов капль воды разрушаются почвенные агрегаты (капельная эрозия), частицы которых в основном разлетаются в радиальном от места удара направлении. Количество и интенсивность разлета таких частиц зависит от характеристик дождя и свойств почвы. Постепенно за время полива такие частицы создают на поверхности кольма-

тируемой почвы тонкий слой, впитывающая способность которого намного меньше впитывающей способности ненарушенной почвы. Поэтому момент появления поверхностного стока также зависит от свойств почвы, ее состояния и характеристик дождя.

Цель исследования – разработка методики определения характеристик напряженно-деформированного состояния почвы, обусловленного ударом капли искусственного дождя.

Задачи исследования, решаемые в рамках данной статьи, заключаются в определении касательных напряжений, проверке условия предельного равновесия

в расчете значений нейтральных напряжений (давлений влаги в порах почвы).

Методика и материалы исследований. При ударе капли о почву возникают две ударные волны – в твердой и жидкой фазах [1-4]. Эти ударные волны определяют вертикальное эффективное давление σ , равное:

$$\bar{\sigma} = \sigma - \psi, \quad (1)$$

где σ – полное давление, оказываемое каплей на почвенный скелет (в твердой фазе); ψ – нейтральное давление влаги в порах почвы (в жидкой фазе).

Из механики грунтов известно, что сопротивление грунтов сдвигу τ есть функция первой степени от нормального напряжения или билинейная зависимость касательных напряжений τ от эффективного давления σ [5, 6]. Эта зависимость носит название закона Мора-Кулона. Разрушение почвы возникает только при некотором предельном значении касательных напряжений $\tau_{пр}$, которое определяется следующим критерием прочности:

$$\tau_{пр} = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

где $\tau_{пр}$ – предельное сопротивление грунтов сдвигу, кПа; σ – нормальное напряжение в грунте в плоскости сдвига, кПа; c – удельное сцепление связного грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения, градус.

Нейтральное давление влаги в порах почвы в данной статье рассчитано путем преобразования формул (1) и (2):

$$\begin{aligned} \psi &= \sigma_{пр} + \sigma_c - \tau_{пр} \operatorname{ctg} \varphi; \\ \sigma_c &= c \operatorname{ctg} \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_{пр}$ – значение эффективного давления, определяемое с помощью графика $\tau_{пр} = f(\sigma)$; σ_c – давление связности почвы, суммарно заменяющее действие всех сил сцепления, кПа.

В предельном состоянии в каждой точке почвы имеются две сопряженные площадки скольжения, наклоненные под углом $\alpha_{пр,1} = \pi/4 - \varphi/2$ к линиям действия максимального σ_1 и $\alpha_{пр,2} = \pi/4 + \varphi/2$ – минимального σ_2 главного напряжения. Условие предельного равновесия напряжений в почве имеет следующий вид:

$$\sin \varphi = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3 + 2\sigma_c), \quad (4)$$

где σ_1, σ_3 – максимальные и минимальные главные напряжения, кПа.

Если правая часть условия (4) оказывается меньше величины $\sin \varphi$, то почва находится в до предельном состоянии по проч-

ности. Стоит отметить, что соотношение напряжений σ_1 и σ_3 , при котором правая часть условия (4) оказывается больше величины $\sin \varphi$, физически невозможно. Соответственно, в том случае, когда правая часть условия (4) равна $\sin \varphi$, можно считать, что почва находится в предельном состоянии, в результате чего происходит разрушение почвы от удара капель дождя. Построение кругов Мора позволяет графически установить предельное состояние.

Принципиальная новизна предлагаемого способа заключается в том, что теория Мора-Кулона для проверки условия предельного напряженного состояния почвы распространяется на единичные удары капель дождя. Полезность полученных результатов для организации мониторинга, охраны и рационального использования окружающей среды подтверждает актуальность данного исследования (см. Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации, утв. Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899).

Исследовались образцы почвы из орошаемого фермерского хозяйства «ИП глава КФХ Бабунов Ю.А.», расположенного в Коломенском городском округе Московской области. Это аллювиальная агротемногумусовая глееватая супесчаная почва (профиль: RU-AUg-Cg^h-Cca, плотность 1250 кг/м³, плотность скелета 2420 кг/м³). Наименование горизонтов давалось по методике Почвенного института имени В.В. Докучаева [7]. Образцы почвы имели влажность на уровне наименьшей влагоемкости (НВ), так как для этих условий капельная эрозия максимальна [8]. Расчет числа Вебера We проводился для контроля условий ($\tau_{пр}$ и $We \gg 1$), при которых напряженно-деформированное состояние почвы будет максимальным (предельным) и будет наблюдаться капельно-дождевая эрозия. Для упрощения расчетов было принято, что капля имеет форму шара с диаметром d_d . Исследовались капли диаметром 1,73 и 2,73 мм. Капли падали с высоты h 1,0, 1,5, 2,0 и 2,5 м. Рабочая жидкость – дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72), температура 20°C, коэффициент поверхностного натяжения $\gamma = 0,07286$ Н/м, плотность 998,203 кг/м³. Температура лабораторного помещения 21°C, относительная влажность воздуха 53%, сопротивление воздуха в расчетах не учитывалось. Обработка данных велась стандартными методами ма-

тематической статистики. Принятый уровень значимости $p = 0,05$, повторность опыта пятикратная. Значения удельного сцепления почвы $c = 14$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$ частиц почвы и капиллярно-сорбционное давление влаги $-9,1$ кПа (соответствующее НВ для данной почвы) приняты по справочным данным. Исследования проводились по схеме и с использованием оборудования, описанных в [3, 9, 10].

Результаты и обсуждение. При обработке данных нулевая гипотеза была отвергнута. Критическое значение критерия Стьюдента $t_a = 5,041$ меньше t_e эмпирического критерия Стьюдента (t -тест), следовательно, наблюдается статистическая значимость между полученными выборками.

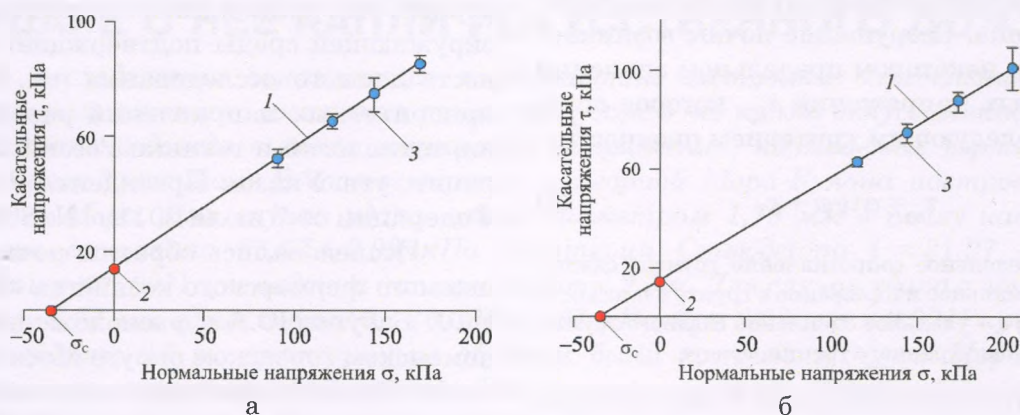


Рис. 1. Графики предельных сопротивлений сдвигу $\tau_{пр} = f(\sigma)$ аллювиальной агротемногумусовой глееватой супесчаной почвы от удара капли дождя диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б):

1 – экспериментальный график сдвига; 2 – величина эффективного сцепления почвы; 3 – доверительный интервал, соответствующий принятому уровню значимости $p = 0,05$; σ_c – давление связности почвы

В соответствии с теорией Мора-Кулона построены круги напряжений Мора. На рисунке 2 приведены круги предельных напряжений при соответствующих предельных значениях касательных напряжений $\tau_{пр,1}$. Для случая удара капли диаметром 1,73 мм о почву напряжение $\tau_{пр,4}$ составило $85,57 \pm 2,99$ кПа ($t_e = 21,27$ и $p < 0,001$) при падении капель с высоты 2,5 м. Для случая удара о почву капель диаметром 2,73 мм сдвиг $\tau_{пр,4}$ составил $101,06 \pm 8,91$ кПа ($t_e = 8,93$ и $p < 0,001$) при падении капель с высоты 2,5 м. Аналогичным образом были построены круги Мора предельных напряжений в почве для всех исследуемых точек графиков $\tau_{пр} = f(\sigma)$.

Для касательных напряжений $\tau_{пр,4}$, возникающих при ударах капель дождя диаметром 1,73 и 2,73 мм, проверены условия

На рисунке 1 приведены графики предельных сопротивлений сдвигу $\tau_{пр} = f(\sigma)$ рассматриваемой почвы от удара капли искусственного дождя. Как отмечено в [3], при некоторой величине $\tau_{пр}$ сдвиг происходить не будет. Этой величиной является величина эффективного сцепления частиц почвы, обозначенная на рисунке 1 цифрой 2. Фактически сдвиг начинается при условии $\tau_{пр} > c$, однако изменение напряженно-деформированного состояния будет незначительным, и «ощутимого» разлета частиц почвы происходить не будет. Действительно, если полидисперсный дождь обладает агротехнически допустимым диапазоном капель, то влияние его на почву будет минимальным.

предельного равновесия. Правая часть условия (4) равна $\sin\varphi$. Это значит, что почва при данном ударе капель дождя находится в предельном состоянии, в результате чего происходит капельная эрозия (разбрызгивание частиц почвы). Аналогичным образом проверены условия предельного состояния для точек $\tau_{пр,3}$, $\tau_{пр,2}$ и $\tau_{пр,1}$ (см. рис. 2), каждая из которых соответствует состоянию разрушения частиц почвы (также происходит разбрызгивание).

Результаты расчета значений нейтральных напряжений (в жидкой фазе почвы) показаны на рисунке 3. Для удара капель диаметром 1,73 мм о почву величины напряжений ψ составили от $-5,57 \pm 0,47$ кПа ($t_e = 57,70$ и $p < 0,001$) до $-10,32 \pm 0,72$ кПа ($t_e = 62,22$ и $p < 0,001$) при падении капель

с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Для случая удара о почву капля диаметром 2,73 мм величины напряжений ψ составили $-7,03 \pm 0,37$ кПа ($t_e = 88,63$ и $p < 0,001$) до $-12,55 \pm 2,16$ кПа ($t_e = 24,72$ и $p < 0,001$) при падении капля с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Стоит отметить, что почва имеет капиллярно-сорбционное давление влаги $-9,1$ кПа (соответствующее НВ).

Можно предположить, что при увеличении этого давления разлет частиц будет происходить интенсивнее. Действительно, почвы, обладающие большей, по сравнению с рассматриваемой, связностью, имеют более высокие значения капиллярно-сорбционного давления (со знаком «-»). Причем тяжелые по гранулометрическому составу почвы наименее подвержены капельной эрозии.

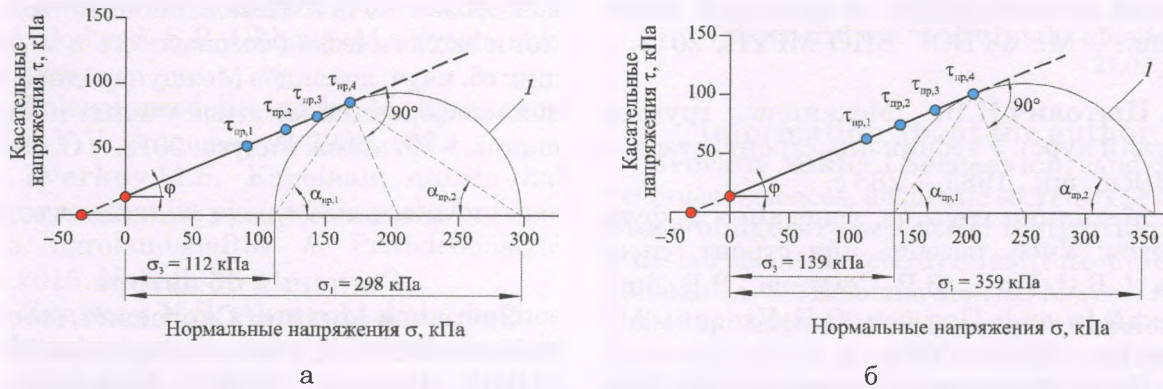


Рис. 2. Круги напряжений Мора и графики предельных сопротивления сдвигу $\tau_{пр} = f(\sigma)$ аллювиальной агротемногумусовой глееватой супесчаной почвы от удара капли дождя диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б):

l – круг предельных напряжений Мора; φ – угол внутреннего трения; $\alpha_{пр,1}$ и $\alpha_{пр,2}$ – углы наклона сопряженных площадок скольжения почвы; σ_1 и σ_3 – главные напряжения (кПа), соответствующие предельным касательным напряжениям $\tau_{пр,4}$

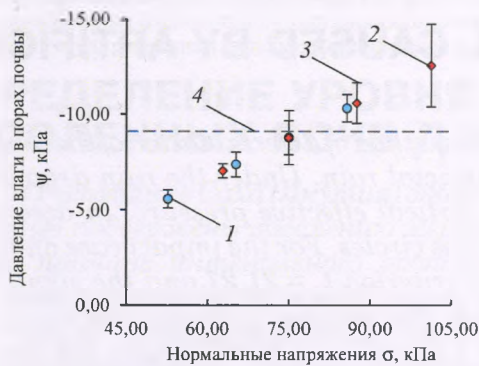


Рис. 3. Результаты расчета нейтрального давления влаги ψ в порах почвы: 1 – данные для удара капли диаметром 1,73 мм; 2 – данные для удара капли диаметром 2,73 мм; 3 – доверительный интервал, соответствующий принятому уровню значимости $p = 0,05$; 4 – капиллярно-сорбционное давление влаги $-9,1$ кПа (соответствующее НВ для данной почвы)

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 дефор-

мация капли при ударе максимальная, в результате чего происходит ее разрушение, которое заканчивается процессом разбрызгивания [2].

Данные расчетов согласуются с материалами прошлых исследований автора. В каждом случае ($\tau_{пр,1}$, $\tau_{пр,2}$, $\tau_{пр,3}$, $\tau_{пр,2}$ и $\tau_{пр,4}$) будет наблюдаться разбрызгивание почвы [3, 11].

Заключение

Разработанная методика, описанная в данной статье, позволяет определять характеристики напряженно-деформированного состояния почвы в результате удара единичной капли. Дальнейшей задачей является проведение численных исследований по определению характеристик напряженно-деформированного состояния почвы, обусловленного воздействием полидисперсного искусственного дождя.

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. Брыль С.В., Зверьков М.С. Вертикальное эффективное давление удара капли о почву. // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 62-67.

3. Ольгаренко Г.В., Брыль С.В., Зверьков М.С. Касательные напряжения в почве при ударе о нее капли искусственного дождя. // Экология и строительство. – 2017. – № 4. – С. 27-36.

4. Касьянов А.Е. Природоохранные технологии осушительных мелиораций: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2012. – 196 с.

5. Цытович Н.В. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.

6. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие для строит. спец. вузов / Б.С. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский [и др.]; Под ред. С.Б. Ухова. – М.: Высш. шк., 2007. – 566 с.

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

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

9. Зверьков М.С. Акустическая диагностика капельной эрозии почв. // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 38-42.

10. 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.

11. Зверьков М.С. Исследование капельной эрозии почв // Инновационные технологии и экологическая безопасность в мелиорации: сб. науч. докладов Международной научной конференции молодых ученых и специалистов. – Коломна: Радуга, 2013. – С. 65-66.

Материал поступил в редакцию 27.09.2018 г.

Сведения об авторе

Зверьков Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, ученый секретарь ФГБНУ ВНИИ «Радуга»; 140483, Московская область, Коломенский р-н, пос. Радужный, д. 38: ООО «Научно-исследовательский центр экологии и строительства», 140491, Московская область, Коломенский район, с. Сергиевское, ул. Новая, д. 21; e-mail: mzverkov@bk.ru

M.S. ZVERKOV^{1,2}

¹ Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga», Kolomna, Russian Federation

² Limited liability company «Scientific-research center of environmental engineering and construction», Kolomna, Russian Federation

LIMIT STRESS STATE OF THE SOIL CAUSED BY ARTIFICIAL RAINDROP IMPACT

The purpose of the investigation is development of the method of determination of the condition of the limit stress of the soil under the impact of the artificial rain. Under the rain drop impact there are arising stresses in the soil which are called vertical effective pressure. In accordance with the theory Mohr-Coulomb there are built Mohr's stress circles. For the impact case on the soil of 1.73 mm shear stress was 85.57 ± 2.99 kPa (Student criterion $t_e = 21.27$ and the significance level was $p < 0.001$) under drop fall from the height 2.5 m. For the case of drop impact on the soil of dia 2.73 mm the shear was 101.06 ± 8.91 kPa ($t_e = 8.93$ and $p < 0.001$) under the drop fall from the height 2.5 m. Similarly Mohr's circles were built for all the investigated shear stresses. The results of the calculated values of neutral stresses (in the liquid soil phase) for drop impact of dia 1.73 mm are in the range from -5.57 ± 0.47 kPa ($t_e = 57.70$ and $p < 0.001$) to -10.32 ± 0.72 kPa ($t_e = 62.22$ and $p < 0.001$) under drop fall from the height from 1.0 to 2.5 m respectively. For the case of drop impact on the soil dia 2.73 mm the values of neutral stresses were -7.03 ± 0.37 kPa ($t_e = 88.63$ and $p < 0.001$) to -12.55 ± 2.16 kPa ($t_e = 24.72$ and $p < 0.001$) under drops fall from the height from 1.0 to 2.5 m respectively. The obtained in the article data are confirmed by the results of investigations of soil spraying at the drop erosion.

Drip erosion, raindrop, drop impact, vertical effective pressure, spraying of the soil

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. Bryl S.V., Zverkov M.S. Vertikalnoe effektivnoe davlenie udara kapli o pochvu. // Prirodoobustroistvo. 2016. № 2. S. 62-67.

3. Olgarenko G.V., Bryl S.V., Zverkov M.S. Kasatelnye napriazheniia v pochve