

УДК 502/504 : 631.6.02 : 620.193.152

КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЧВЕ ПРИ УДАРЕ О НЕЕ КАПЛИ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ

Поступила 15.12.2017 г.

© **Ольгаренко Геннадий Владимирович¹, Брыль Сергей Валерьевич²,
Зверков Михаил Сергеевич^{1, 2}**¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна, Россия² Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экологии и строительства», г. Коломна, Россия

SHEAR STRESS CAUSED BY ARTIFICIAL RAINDROP IMPACT AT THE SOIL SURFACE

Received on December 15, 2017

© **Olgarenko Gennadii Vladimirovich¹, Bryl Sergei Valerevich²,
Zverkov Mikhail Sergeevich^{1, 2}**¹ Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga», Kolomna, Russia² Limited liability company «Scientific-research center of environmental engineering and construction», Kolomna, Russia

Цель исследования заключается в разработке методики определения характеристик напряженно-деформированного состояния почвы, обусловленного ударом капли искусственного дождя для повышения точности и упрощения проведения научных исследований капельно-дождевой эрозии, полевых и лабораторных испытаний дождевальной техники. Проведен расчет касательных напряжений, возникающих в месте удара капли искусственного дождя о почву, установлена роль этих напряжений в механизме развития капельно-дождевой эрозии, показана целесообразность определения данной величины при испытании дождевальной техники. Для удара каплей диаметром 1,73 мм о почву величины касательных напряжений составили от $158,44 \pm 7,32$ кПа (уровень значимости $p < 0,001$) до $281,76 \pm 11,18$ кПа ($p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Для случая удара о почву каплей диаметром 2,73 мм сдвиг составил $196,51 \pm 5,72$ кПа ($p < 0,001$) до $339,71 \pm 33,35$ кПа ($p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Величины сдвиговых напряжений τ достоверно коррелируют со значениями высоты падения h каплей (для каплей диаметром $d_d = 1,73$ мм коэффициент корреляции $r = 0,963 \pm 0,029$, $p < 0,001$; при $d_d = 2,73$ мм $r = 0,977 \pm 0,014$, $p < 0,001$). Медианное время удара капли 1,73 мм о почву составило $(5,95 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$ с, для капли 2,73 мм время составило $(6,53 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$ с. Числа Вебера We для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределе 459...1156, для капли 2,73 мм – 728...1829.

Ключевые слова: водная эрозия, капельная эрозия, капля, дождь, оценка воздействия, давление, разбрызгивание почвы, почва, эрозия, дождевание, капельная.

The purpose of this research is to develop methods of determination of the stress-strain state of the soil due to the drop impact of artificial rain to increase the accuracy and simplify the research of drop and rain erosion, field and laboratory testing of sprinkler equipment. The calculation of the shear stresses arising at the point of impact drops of artificial rain on soil, the role of these stresses in the mechanism for the development of drop and rain erosion, the expediency this value for testing irrigation equipment. For impacts of drop with a diameter of 1.73 mm on the basis of the magnitude of the shear stress was $158,44 \pm 7.32$ kPa (significance level $p < 0.001$) to $281,76 \pm 11,18$ kPa ($p < 0.001$) in the fall drops from a height from 1.0 to 2.5 m, respectively. For the case of hitting the ground drops with a diameter of 2.73 mm shear stress was $196,51 \pm 5.72$ kPa ($p < 0.001$) to $339,71 \pm 33,35$ kPa ($p < 0.001$) in the fall drops with a height from 1.0 to 2.5 m, respectively. The values of shear stress τ significantly correlated with the values of the drop height h of the droplets (for drops with a diameter $d_d = 1,73$ mm correlation coefficient $r = 0,963 \pm 0,029$, $p < 0.001$; $d_d = 2,73$ mm $r = 0,977 \pm 0,014$, $p < 0.001$). The median time of impact of drop 1.73 mm by soil was $(5,95 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$ sec., for the drop with a diameter 2.73 mm the time was $(6,53 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$ sec. Weber numbers We for the drop with the diameter of 1.73 mm were 459...1156, for the drop with the diameter of 2.73 mm – 728...1829.

Keywords: water erosion, raindrop erosion, splash erosion, drop, rain, impact assessment, pressure, soil splash, soil, erosion, sprinkler irrigation.

Введение. Орошаемое земледелие – самый продуктивный сектор сельскохозяйственного производства. Продуктивность орошаемого гектара составляет в 3...8 раз больше продуктивности 1 гектара естественно увлажненных

Актуальность исследования. В настоящее время в связи с физическим износом парка дождевальных машин и возросших агротехнических требований к эксплуатации мелиоративных систем ведется разработка и создание экологически безопасной оросительной техники нового поколения, обеспечивающей рациональное использование мелиорируемых земель. По данным ФГБНУ «РосНИИПМ» в исправном состоянии находится не более 50% широкозахватной дождевальной техники [1]. А по данным ФГБНУ ВНИИ «Радуга» по состоянию на 2016 год (рис. 1) в России из 4,66 млн га орошаемых земель фактически использовалось 3,88 млн га [2]. Из этих земель в техническом перевооружении нуждаются 1,495 млн га [3]. В соответствии с положениями Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (утвержденной Указом Президента России от 30 января 2010 г. № 120) и Концепции социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р) Государством поставлена задача по восстановлению мелиоративного фонда. Поэтому актуальным становится вопрос технического перевооружения существующих (в том числе внедрения новой оросительной техники), а также создание новых и возвращение выбывших из оборота мелиоративных систем. Кроме того, актуальными задачами являются направления совершенствования технических средств и технологических процессов полива дождевальными машинами на основе требований водо- и энергосбережения, предотвращения экологических кризисов, получения оптимальной и устойчивой биопродуктивности сельскохозяйственного производства, что требует проведения комплексных мелиоративных исследований [21, 22]. Одним из основных показателей агротехнических требований на разработку дождевальной техники являются энергетические характеристики искусственного дождя, которые обуславливают возникновение поверхностного стока и определяют величину допустимой нормы полива. Такие характеристики

контролируются на конечном этапе создания дождевальной техники – при проведении государственных приемочных испытаний. Так, при неудовлетворительном качестве искусственного дождя повреждаются листья, цветы, завязи растений, разрушается структура почвы, обусловленная возникновением эрозии от ударов капель.

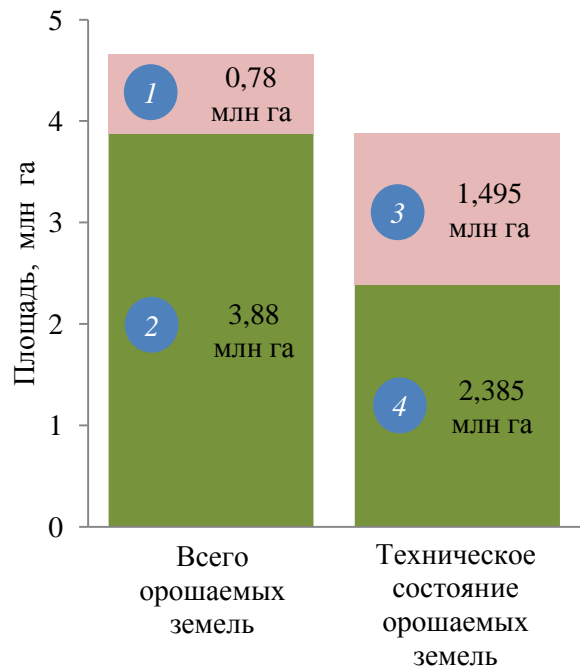


Рис. 1. Использование орошаемых земель по данным ФГБНУ ВНИИ «Радуга»: 1 – неиспользуемые земли из общей площади мелиорированных земель; 2 – площадь фактически орошаемых земель; 3 – площадь (1,495 млн га) нуждающихся в техническом перевооружении систем из общей фактически орошаемой площади (3,88 млн га); 4 – земли, которые не нуждаются в техническом перевооружении, включая земли, состояние техники на которых близко к износу

Цель исследования – разработка методики определения характеристик напряженно-деформированного состояния почвы, обусловленного ударом капли искусственного дождя для повышения точности и упрощения проведения научных исследований капельно-дождевой дождевой эрозии, полевых и лабораторных испытаний дождевальной техники.

Задачи исследования, решаемые авторами в рамках данной статьи, заключаются в расчете касательных напряжений, возникающих в месте удара капли искус-

ственного дождя о почву, в установлении роли этих напряжений в механизме развития капельно-дождевой эрозии для выявления целесообразности определения данной величины при испытании дождевальной техники.

Методика и материалы исследований. Капельная эрозия возникает в результате динамического воздействия капель искусственного дождя на почву. У падающих капель к моменту удара кинетическая энергия становится максимальной. В момент удара раздробленные почвенные частицы разбрызгиваются, и происходит кольматация, приводящая к возникновению почвенной корки, которая снижает скорость впитыванию воды в почву и обуславливает следующую стадию ирригационной эрозии – поверхностный сток. При испытании дождевальной техники разработчикам требуется определить величину оказываемого на почву давления искусственного дождя. В момент удара о поверхность, в том числе о поверхность почвы, капля ведет себя как твердое тело. По данным многочисленных исследований зарубежных авторов, продолжительность действия давления на почву в этот момент настолько короткое, что оно не влияет на эрозию [4, 5]. В ранних исследованиях этого процесса показано сходное с эффектом гидравлического удара воздействие капель на твердые поверхности [4, 6, 7, 8, 9]. Во второй фазе удара давление в капле резко падает, и она растекается по поверхности. Причем распределение давлений симметрично относительно точки удара [4, 10, 11]. 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 [4, 10, 12, 13]. При ударе капли о почву возникают две ударные волны – в твердой и жидкой фазах, что детально описано в работе [4]. Как отмечает М. А. Nearing [13], для понимания механики процесса разбрызгивания и деформации почвы при капельной эрозии важно знать вертикальное эффективное давление p_e , которое можно определить по зависимости:

$$p_e = p_f - p_p, \quad (1)$$

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

В работе [4] приведены значения p_e по формуле (1), полученные при измере-

нии динамических характеристик капли с помощью устройства [14]. Для капли диаметром 1,73 мм, падающей с высоты 1,0...2,5 м, эффективное давление находится в пределах 193,54...285,36 кПа соответственно, для капли 2,73 мм – 197,16...295,80 кПа. Измеренное время удара капли о почву составило $7,8...8 \cdot 10^{-5}$ с. Известно, что максимальное давление, которое возникает в почве при ударе, отмечается на границе капли [15] и может достигать 10...14 МПа, что сопоставимо с давлением гидравлического удара в поровой влаге [4, 13]. При ударе капли (рис. 2) о твердую поверхность от границы контакта в противоположном направлении начинает распространяться ударная волна, вызывающая колебания внутри жидкости.

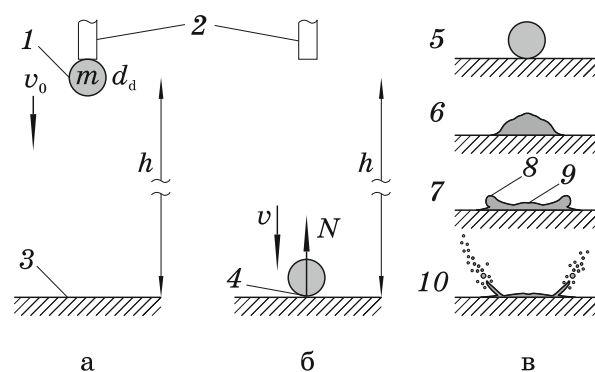


Рис. 2. Схема падения (а), удара (б) и разбрызгивания (в) капли [4, 16]: 1 – капля; 2 – инъектор; 3 – контактная поверхность; 4 – передняя кромка капли; 5 – момент удара; 6 – процесс распространения в капле ударной волны; 7 – растекание капли; 8 – деформация свободной поверхности; 9 – образование ламеллы; 10 – образование «коронки» и разрушение капли; N – сила удара капли о поверхность.

Дальнейшее распространение ударной волны вызывает деформацию свободной поверхности и образуется тонкая ламелла. Сжатие капли становится максимальным, происходит разрушение капли с образованием «коронки» [16]. Это явление, по-видимому, обуславливает образование каверн на поверхности почвы после дождя и разлет частиц почвы не из центра удара (контакта), а преимущественно по периферии деформированной капли. Разлет происходит в результате возникновения сдвиговых напряжений в почве.

Из механики грунтов известно, что сопротивление грунтов сдвигу τ есть функция первой степени от нормального напряжения σ [17]. Эта зависимость носит название закона Кулона. Однако не от всякого удара капли наблюдается разбрызгивание частиц почвы. Разрушение почвы возникает только при некотором предельном значении τ , которое определяется законом Кулона для связных грунтов по следующей зависимости:

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

где $\tau_{\text{пр}}$ – 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.

Для данного исследования принято допущение, что величины c и φ в процессе удара остаются постоянными и независимыми от σ . В этом случае значение σ от удара капли определенного размера d_d , падающей с некоторой высоты h , также постоянно и зависит от динамических характеристик искусственного дождя. Поэтому увеличение сжимающего давления приводит к возрастанию величины $\tau_{\text{пр}}$. Очевидно, что чем больше при равных значениях σ величины параметров φ и c , тем более прочным и устойчивым к капельной эрозии является данная почва. Как показано выше, в месте удара возникает эффективное давление p_e (1), которое в рассматриваемом напряженно-деформированном состоянии почвы эквивалентно σ . Схема развития сдвигового давления в почве по Al-Durrah и Bradford (1982) [20] показана на рисунке 3.

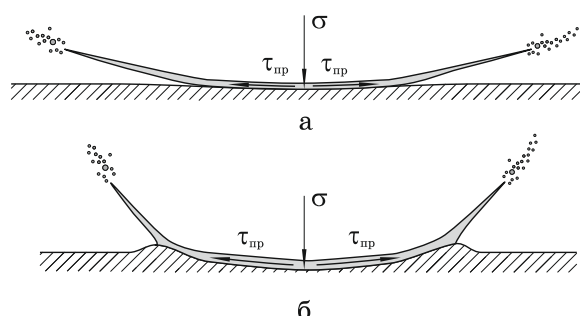


Рис. 3. Требуемая экспериментальной проверки схема развития высоких (а) и низких сдвиговых напряжений (б) в почве при ударе капли дождя по Al-Durrah и Bradford

В исследовании [20] показано, что при увеличении угла разлета частиц их суммарная масса падает, а увеличение τ обратно увеличению угла разлета (угол между вылетом частиц и горизонтом). При этом неясно, как в этом случае учитывается фундаментальный закон сопротивления почв сдвигу τ , прямо пропорционального нормальному напряжению σ . Многочисленными лабораторными и полевыми экспериментами доказано, что искусственный дождь должен иметь агротехнически допустимый диаметр. Согласно зависимости (2) и, основываясь на данных из работы [20], следовало бы сделать вывод о том, что для одной и той же почвы при ударе капли меньшего диаметра сдвиг и расстояние разлета частиц должны быть максимальными. Однако результаты, описанные в работе [20], основаны на обработке данных исследований различных по гранулометрическому составу почв и всего одной капли диаметром 4,6 мм, падавшей с высоты 890 см (в этом случае следует учитывать величину деформации капли). В ходе исследования Al-Durrah и Bradford величина сопротивления почв сдвигу варьировалась от типа почвы и определялась с помощью лабораторного пенетрометра (вероятно авторы определяли величину сопротивления пенетрации). Схема (рис. 3) требует уточнения и проверки.

Исследования проводили на установке, детально описанной в работе [4]. В качестве измерительной аппаратуры для определения времени t удара капли о почву, диаметра капли d_d использовали устройство для измерения динамического действия дождя [14, 23] (рис. 4), интерпретация показаний устройства велась с помощью разработанной компьютерной программы [18]. Используемое в данной работе устройство не является техническим средством, описание которого приведено в цели настоящего исследования, а применяется для нахождения искомых величин и апробации методики определения τ . Нормальное напряжение σ рассчитывали по формуле эффективного давления (1), а методика расчета входящих в нее величин описана в [4]. Касательные напряжения $\tau_{\text{пр}}$ рассчитывались по формуле (2). Значения удельного сцепления $c = 14$ кПа и угол внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$ частиц почвы приняты по справочным данным.

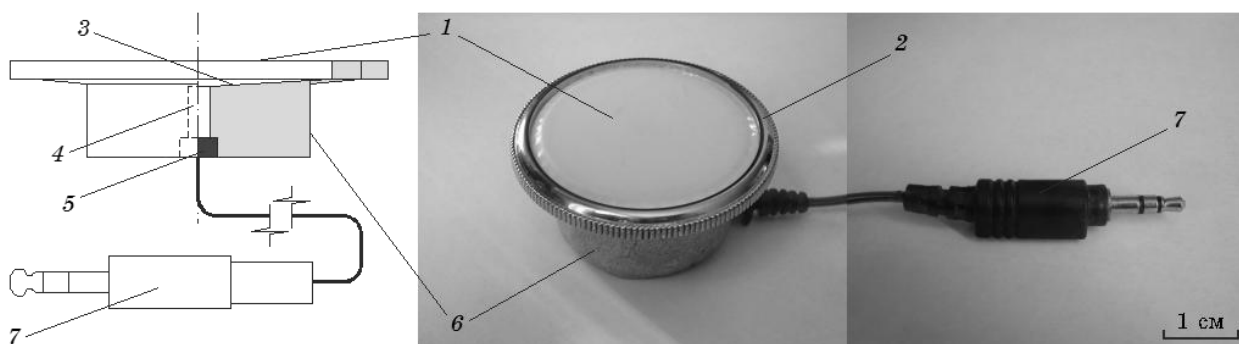
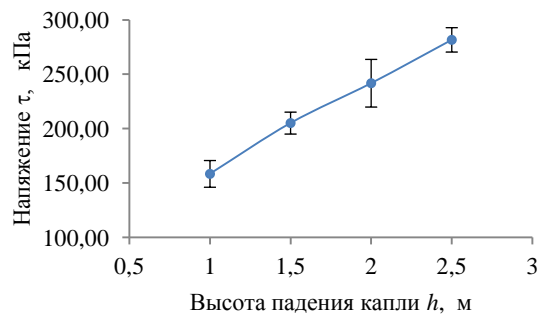


Рис. 4. Устройство для измерения динамического действия дождя на почву: а – схема с разрезом; б – фотография устройства; 1 – пластиковая мембрана; 2 – крепление пластиковой мембраны; 3 – акустическая диафрагма; 4 – соединительная трубка; 5 – узел регистрации звука (микрофон); 6 – корпус прибора; 7 – разъем подключения «мини-джек» с кабелем

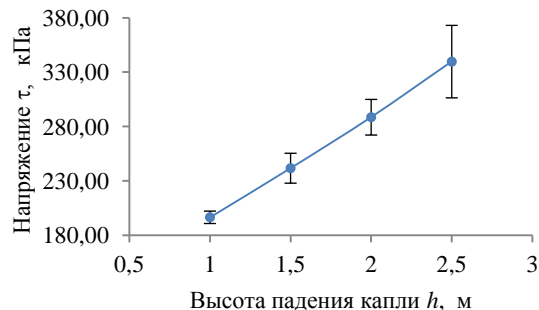
Исследовались образцы почвы из орошаемого фермерского хозяйства «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.», расположенного в Коломенском районе Московской области. Это аллювиальная агротемногумусовая глееватая супесчаная почва (профиль: PU-AUg-Cg[~]-Cca, плотность 1250 кг/м³, плотность скелета 2420 кг/м³). Наименование горизонтов давалось по методике Почвенного института имени В. В. Докучаева [19]. Образцы почвы имеют влажность на уровне наименьшей влагоемкости, так как для этих условий капельная эрозия максимальна [24]. 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 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 °С, коэффициент поверхностного натяжения $\gamma = 0,07286$ Н/м, плотность 998,203 кг/м³. Температура лабораторного помещения 21 °С, относительная влажность воздуха 53 %, сопротивлением воздуха в предварительных расчетах пренебрегали. Обработка данных велась по стандартными методами математической статистики. Принятый уровень значимости $p = 0,05$.

Результаты и обсуждение. При обработке данных нулевая гипотеза была отвергнута. Критическое значение крите-

рия Стьюдента $t_\alpha = 5,041$ меньше t_e эмпирического критерия Стьюдента (t -тест), следовательно наблюдается статистическая значимость между полученными выборками и показаниями прибора. Результаты расчета сдвиговых напряжений представлены на рисунке 5. Доверительный интервал соответствует установленному уровню значимости.



а



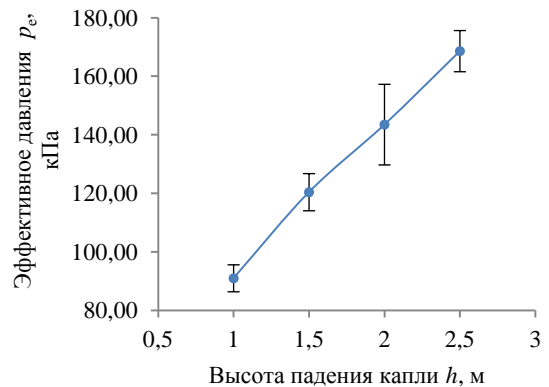
б

Рис. 5. Сдвиговые (касательные) напряжения τ в почве при ударе капли диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б) при установленном уровне значимости $p < 0,001$

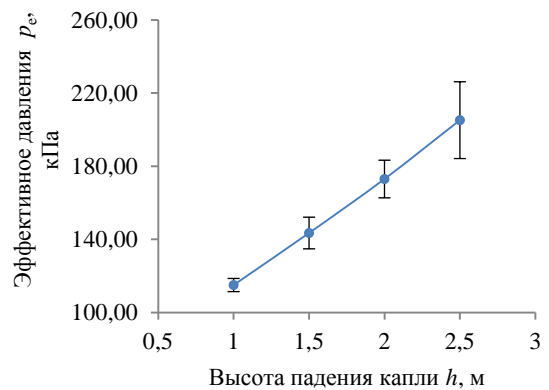
Для удара каплей диаметром 1,73 мм о почву величины касательных напряжений составили от $158,44 \pm 7,32$ кПа ($t_e = 15,30$ и $p < 0,001$) до $281,76 \pm 11,18$ кПа ($t_e = 16,78$ и $p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Для случая удара о почву каплей диаметром 2,73 мм сдвиг составил $196,51 \pm 5,72$ кПа ($t_e = 23,67$ и $p < 0,001$) до $339,71 \pm 33,35$ кПа ($t_e = 6,69$ и $p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно.

Стоит отметить, что значения эффективного давления, полученные в данном исследовании, отличаются от величин p_e , установленных ранее в [4]. Это связано с указанным выше допущением, что по периферии контакта капли и почвы p_e максимально, а роль его в развитии эрозии минимально. Поэтому в данной работе давление p_e определялось как можно ближе к центру удара и оказались ниже указанных в [4] (рис. 6). Для капли диаметром 1,73 мм, падающей с высоты 1,0...2,5 м, эффективное давление находится в пределах $90,95 \pm 4,01 \dots 168,60 \pm 7,04$ кПа соответственно, для капли 2,73 мм – $114,92 \pm 3,59 \dots 205,09 \pm 19,99$ кПа. Величины сдвиговых напряжений τ достоверно коррелируют со значениями высоты падения h капель (для капель диаметром $d_d = 1,73$ мм коэффициент корреляции $r = 0,963 \pm 0,029$, $p < 0,001$ и $t_e = 20,48$; при $d_d = 2,73$ мм $r = 0,977 \pm 0,014$, $p < 0,001$ и $t_e = 13,17$). Эмпирическое значение коэффициента Стьюдента t_e во всех случаях выше критического $t_\alpha = 8,61$, следовательно связь между касательным напряжением τ (результативным показателем) и высотой падения капель h (факторным показателем) является надежной, а величина коэффициентов корреляции – значимой. Удар капли отличается от удара дождя. Предположительно, интегральное воздействие на почву дождя должно быть меньше указанных величин, так как дождеобразующие устройства создают полидисперсный дождь. Поэтому при оценке величины давления дождя на почву необходимо учитывать количественное влияние

отдельных капель на процесс разбрызгивания. Этот вопрос является предметом дальнейших исследований.



а



б

Рис. 6. Эффективное давление при ударе капли диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б)

Кривые предельных сопротивлений сдвигу рассматриваемой почвы от удара капли искусственного дождя показаны на рисунке 7. Анализ графиков показывает, что при некоторой величине $\tau_{пр}$ сдвиг происходит не будет. Этой величиной является величина эффективного сцепления частиц почвы, обозначенная на рисунке 7 цифрой 4. Фактически сдвиг начинается при условии:

$$\tau_{пр} > c,$$

однако изменение напряженно-деформированного состояния будет незначительным, и ощутимый разлет частиц почвы происходить не будет. Действительно, если полидисперсный дождь обладает агротехнически допустимым диапазоном капель, то влияние его на почву будет минимальным.

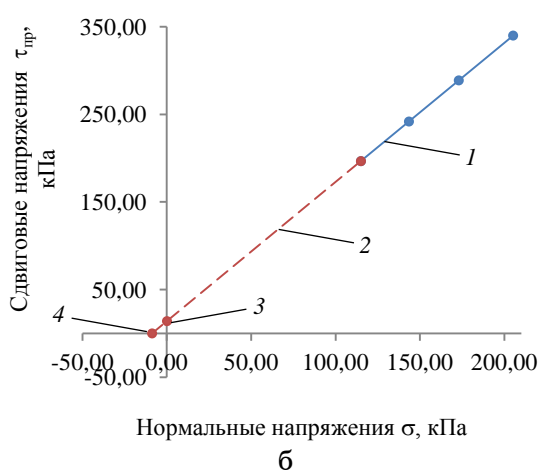
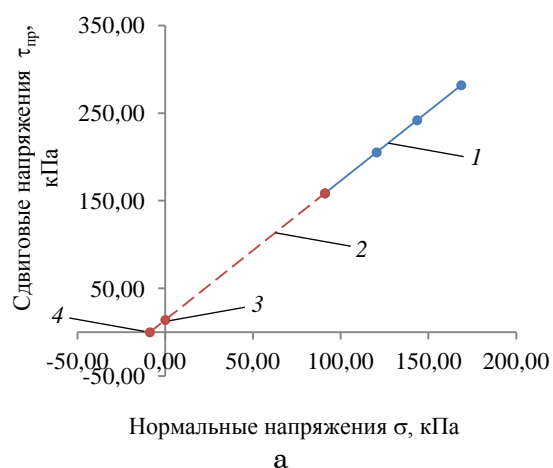


Рис. 7. Графики предельных сопротивлений сдвигу $\tau_{пр} = f(\sigma)$ аллювиальной агротемногумусовой глееватой супесчаной почвы от удара капли дождя диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б): 1 – экспериментальный график сдвига; 2 – «теоретический» график сдвига; 3 – величина эффективного сцепления почвы; 4 – давление связности почвы σ_c

Медианное время удара (рис. 8) капли 1,73 мм о почву, полученное с помощью устройства, составило $(5,95 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$ с, для капли 2,73 мм время составило $(6,53 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$ с. Несмотря на очень короткую длительность удара, из-за малых размеров и площади контакта капля оказывает на почву большое давление [4]. Отмечается интересная особенность. Время удара достоверно обратно (коэффициенты корреляции $r < 0$) коррелирует с высотой падения h капли, наблюдается тесная связь между r и h . Для капли диаметром 1,73 мм коэффициент корреляции между временем удара и высотой падения составил $-0,794 \pm 0,198$ ($t_e =$

$7,31$ и $p < 0,05$), для капли 2,73 мм корреляция составила $-0,788 \pm 0,180$ ($t_e = 7,96$ $p < 0,05$). В научной литературе авторами статьи похожих данных найдено не было.

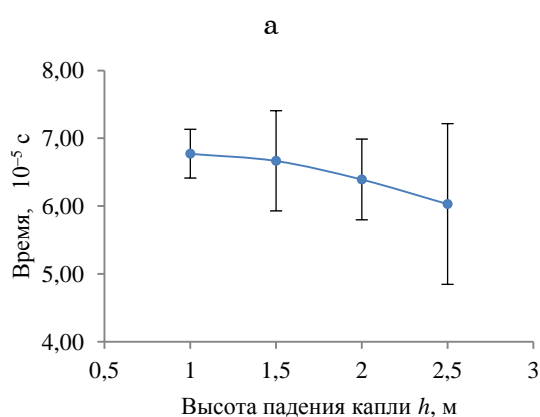
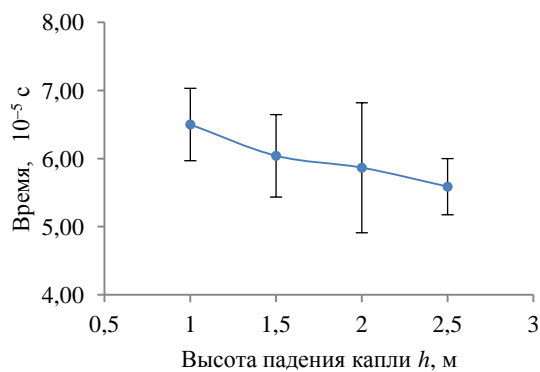


Рис. 7. Длительность удара о почву капли диаметром 1,73 мм (а) и 2,73 мм (б)

Числа Вебера We для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределах 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. 2, 3) [4].

Заключение

Исследования показали, что с помощью рассматриваемой методики возможно определение сдвиговых напряжений в почве, возникающих в результате удара капли дождя. Для удара каплей диаметром 1,73 мм о почву величины касательных напряжений составили от $158,44 \pm 7,32$ кПа (уровень значимости $p < 0,001$) до $281,76 \pm 11,18$

кПа ($p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Для случая удара о почву капля диаметром 2,73 мм сдвиг составил $196,51 \pm 5,72$ кПа ($p < 0,001$) до $339,71 \pm 33,35$ кПа ($p < 0,001$) при падении капель с высоты от 1,0 до 2,5 м соответственно. Величины сдвиговых напряжений τ достоверно коррелируют со значениями высоты падения h капель (для капель диаметром $d_d = 1,73$ мм коэффициент корреляции $r = 0,963 \pm 0,029$, $p < 0,001$; при $d_d = 2,73$ мм $r = 0,977 \pm 0,014$, $p < 0,001$). Медианное время удара капли 1,73 мм о почву составило $(5,95 \pm 0,57) \cdot 10^{-5}$ с, для капли 2,73 мм время составило $(6,53 \pm 0,67) \cdot 10^{-5}$ с. Числа Вебера We для капли диаметром 1,73 мм находятся в пределах 459...1156, для капли 2,73 мм – 728...1829. Результаты исследования позволяют заключить, что определение характеристик напряженно-деформированного состояния почвы при изучении воздействия на нее искусственного дождя целесообразно проводить совместно с оценкой получаемого с помощью насадок диапазона капель. Этот вопрос является предметом дальнейших исследований.

Библиографический список:

1. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России: информ. издание. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 220 с.
2. Горнов Г.С., Кочеткова Л.П., Ольгаренко Г.В., Старцев З.А. Отчет о реализации I этапа (2014-2016 годы) федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России на 2014-2020 годы». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 88 с.
3. Провести исследования и разработать нормативно - методические документы для машинно-технологического обеспечения ремонтно-эксплуатационных работ на гидромелиоративных системах [Текст]: отчет о НИР: С. 144 / ФГБНУ ВНИИ «Радуга»; рук. Ольгаренко Г.В.; исполн.: Турапин С.С. [и др.]. – Коломна, 2017. – 160 с. – № ГР АААА-А17-117052310009-5.
4. Брыль С.В., Зверьков М.С. Вертикальное эффективное давление удара капли о почву // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 62-67.
5. Ghadiri H. Raindrop impact and splash erosion // Encyclopedia of soil science. – 2006. – P. 1428–1432.
6. Гегузин Я. Е. Капля. – М.: Наука, 1977. – 134 с.
7. 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.
8. 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.
9. Брыль С. В., Зверьков М. С. Теоретические подходы к расчету вертикального эффективного давления капель искусственного дождя о почву и твердую поверхность // Экология и строительство. – 2016. – № 1. – С. 18-21.
10. 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.
11. Richard D., Clanet C., Quere D. Contact time of a bouncing drop // Nature. – 2002. – Vol. 417. – P. 811.
12. 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.
13. Nearing M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff // Eurasian soil science. – 1997. – Vol. 30. – № 5. – P. 552–556.
14. 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.
15. Eggers, J. G., Fontelos, M., Josserand, C., & Zaleski, S. Drop dynamics after impact on a solid wall: Theory and simulations // Physics of Fluids. – 2010. – Vol. 22. – No. 6. – URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3432498> (дата обращения: 16.12.2017).
16. Зверьков М. С. Численные исследования удара капли о твердую поверхность // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 17-20.

17. 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.

18. Анализ сигнала капли: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614657 / Автор и правообладатель М. С. Зверьков. – № 2015614657. – Заяв. № 2015612150; заявл. 05.03.2015; опубли. 20.05.2015. – Бюл. № 5. – 1 с.

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

20. Al-Durrah M. M., Bradford J. M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1982. – Vol. 46. – P. 1086-1090.

21. Брыль С.В. Оценка природной теплообеспеченности агроландшафтов Московской области // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С. 26-30.

22. Брыль С.В. Режимы орошения и минерального питания при выращивании моркови // Экология и строительство. – 2015. – № 4. – С. 18-21.

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

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

Сведения об авторах

Ольгаренко Геннадий Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор; директор; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга»; пос. Радужный, д. 38, Коломенский район, Московская обл., 140483

Брыль Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, директор; Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экологии и строительства»; ул. Ленина, д. 139, г. Коломна, Московская область, 140411.

Зверьков Михаил Сергеевич, кандидат технических наук; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-

исследовательский институт «Радуга»; пос. Радужный, д. 38, Коломенский район, Московская обл., 140483; e-mail: mzverkov@bk.ru.

References

1. Razvitie melioracii zemel' sel'skoho-zajstvennogo naznachenija v Rossii: inform. izdanie. – М.: FGBNU «Rosinformagroteh», 2016. – 220 s.

2. Gornov G.S., Kochetkova L.P., Ol'garenko G.V., Starcev Z.A. Otchet o realizacii I jetapa (2014-2016 gody) federal'noj celevoj programmy «Razvitie melioracii zemel' sel'skoho-zajstvennogo naznachenija v Rossii na 2014-2020 gody». – М.: FGBNU «Rosinformagroteh», 2017. – 88 s.

2. Provesti issledovanija i razrabotat' normativno - metodicheskie dokumenty dlja mashinno-tehnologicheskogo obespechenija remontno-jekspluatacionnyh rabot na gidromeliorativnyh sistemah [Tekst]: otchet o NIR: S. 144 / FGBNU VNII «Raduga»; ruk. Ol'garenko G.V.; ispoln.: Turapin S.S. [i dr.]. – Kolomna, 2017. – 160 s. – № GR AAAA-A17-117052310009-5.

4. Bryl' S.V., Zver'kov M.S. Vertikal'noe jeffektivnoe davlenie udara kapli o pochvu // Prirodoobustrojstvo. – 2016. – № 2. – S. 62-67.

5. Ghadiri H. Raindrop impact and splash erosion // Encyclopedia of soil science. – 2006. – P. 1428-1432.

6. Geguzin Ja. E. Kaplja. – М.: Nauka, 1977. – 134 s.

7. Kas'janov A. E. Ballistika kapel'noj jerozii pochv // Problemy kompleksnogo obustrojstva tehnoprirodnih sistem: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – М.: FGBOU VPO MGUP, 2013. – S. 210-215.

8. 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.

9. Bryl' S. V., Zver'kov M. S. Teoreticheskie podhody k raschetu vertikal'nogo jeffektivnogo davlenija kapel' iskusstvennogo dozhdja o pochvu i tverduju poverhnost' // Jekologija i stroitel'stvo. – 2016. – № 1. – S. 18-21.

10. 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.

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

12. 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.

13. Nearing M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff // *Eurasian soil science*. – 1997. – Vol. 30. – № 5. – P. 552-556.

14. Ustrojstvo dlja izmerenija dinamicheskogo dejstvija dozhdja na pochvu: Pat. 155056 (Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 33/24, A 01 G 25/00 / Av-tory, zajaviteli i patentoobladateli: A. E. Kas'janov, M. S. Zver'kov. – № 2015107899; zajavl. 05.03.2015; opubl. 20.09.2015. – *Bjul.* № 26. – 1 s.

15. Eggers, J. G., Fontelos, M., Josserand, C., & Zaleski, S. Drop dynamics after impact on a solid wall: Theory and simulations // *Physics of Fluids*. – 2010. – Vol. 22. – No. 6. – URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3432498> (data obrashhenija: 16.12.2017).

16. Zver'kov M. S. Chislennye issledovanija udara kapli o tverduju poverhnost' // *Prirodoobustrojstvo*. – 2015. – № 2. – S. 17-20.

17. *Mehanika gruntov, osnovanija i fundamenty: Ucheb. posobie dlja stroit. spec. vuzov* / B. S. Uhov, V. V. Semenov, V. V. Znamenskij [i dr.]; Pod red. S. B. Uhova. – M.: Vyssh. shk., 2007. – 566 s.

18. Analiz signala kapli: Svide-tel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2015614657 / Avtor i pravoobladatel' M. S. Zver'-kov. – № 2015614657. – Zajav. № 2015612150; zajavl. 05.03.2015; opubl. 20.05.2015. – *Bjul.* № 5. – 1 s.

19. Polevoj opredelitel' pochv. – M.: Pochvennyj in-t im. V. V. Dokuchaeva, 2008. – 182 s.

20. Al-Durrah M. M., Bradford J. M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1982. – Vol. 46. – P. 1086-1090.

21. Bryl' S.V. Ocenka prirodnoj teplovlogoobespechennosti agrolandshaftov

Moskovskoj oblasti // *Jekologija i stroitel'stvo*. – 2015. – № 3. – S. 26-30.

22. Bryl' S.V. Rezhimy oroshenija i mineral'nogo pitanija pri vyrashhiva-nii morkovi // *Jekologija i stroitel'stvo*. – 2015. – № 4. – S. 18-21.

23. Kas'janov A.E., Zver'kov M.S. Oborudovanie dlja kontrolja jerozionnoj opasnosti dozhdja // *Melioracija i vod-noe hozjajstvo*. – 2015. – № 2. – S. 13-16.

24. Zver'kov M.S. Kapel'naja jerozija kak faktor narushenija plodorodija pochv oroshaemyh agrolandshaftov // *Prirodoobustrojstvo*. – 2013. – № 5. – S. 31-34.

Information about the authors

Olgarenko Gennadii Vladimirovich, doctor of agricultural sciences, professor; director; Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga»; Raduzhnyj, 38, Kolomna district, Moscow region, 140483.

Bryl Sergei Valerevich, candidate of technical sciences, director; Limited liability company «Scientific-research center of environmental engineering and construction»; Lenina st., 139, Kolomna, Moscow region, 140411.

Zverkov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences; Federal state budgetary scientific institution «All-Russian scientific research Institute «Raduga»; Raduzhnyj, 38, Kolomna district, Moscow region, 140483; e-mail: mzverkov@bk.ru.

Для цитирования: 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.

For citations: Olgarenko G.V., Bryl S.V., Zverkov M.S. Shear stress caused by artificial raindrop impact at the soil surface // *Ekologiya & Stroitelstvo*. – 2017. – № 4. – P. 27-36