

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ УГЛА АТАКИ НА СКОРОСТЬ РАЗМЫВА СВЯЗНОГО ЗЕРНИСТОГО ГРУНТА НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ

© 2018 г. Г. А. Ларионов*, О. Г. Бушуева, А. В. Горобец, Н. Г. Добровольская,
З. П. Кирюхина, С. Ф. Краснов, Л. В. Кобыльченко (Куксина),
Л. Ф. Литвин, И. И. Судницын

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы
*e-mail: laronov425@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2016 г.

Из экспериментов на гидравлическом лотке с коленообразным изгибом было известно, что при углах подхода оси потока к борту русла под углом от 0° до 50° скорость размыва почвы увеличивается более чем в два раза. При больших углах излома русла эксперимент проводить не удавалось из-за возникновения подпора. В настоящей работе излагаются результаты размыва струей воды, подходящей к поверхности образцов под углами от 2° до 90°. Установлено, что максимальная скорость размыва наблюдается при углах атаки около 45°, а минимальная – при 90°. Различия между максимальной и минимальной скоростью размыва достигают 500%. Причиной этого являются различия в интенсивности проникновения свободной воды в верхние слои почвы, а также гидродинамический напор, наиболее сильно проявляющийся при угле атаки в 90°. Проникновение воды в межагрегатное пространство приводит к разрушению связей между агрегатами, что является главным условием захвата частиц потоком.

Ключевые слова: размыв почв и грунтов струей воды, разрушение межагрегатных связей, расклинивающее давление пленок воды

DOI: 10.7868/S0032180X18020132

ВВЕДЕНИЕ

В работе Маккаеева “Сток и русловые процессы” [6] отмечается, что “направление струй по отношению к размываемой поверхности (угол атаки)” оказывает большое влияние на скорость размыва бортов, и связано оно с гидромониторным эффектом, воздействие которого достигает максимума, если струи перпендикулярны к размываемой поверхности. Такой механизм размыва особенно актуален для ручейков на пахотных землях, которые в плане имеют ломаную конфигурацию, изначально обусловленную микрорельефом пашни. Это положение было проверено в эксперименте на гидравлическом лотке, в котором с помощью вкладышей можно было при постоянной ширине потока, изменять угол подхода оси потока к почвенному образцу [4]. Образец почвы устанавливали на боковой стенке лотка, обращенной навстречу потока. Угол подхода оси потока к образцу почвы изменяли от 0° до 50° с шагом в 10°. В этом диапазоне углов атаки скорость размыва почвенных образцов увеличивалась более чем два раза. При больших углах перед изгибом русла в бурных потоках образуется подпор, и скорость уменьшается, в связи с чем в этой области исследования не

проводили, хотя, по мнению Маккаеева [6], максимальное влияние “гидромониторного эффекта” на размыв бортов должно наблюдаться при подходе оси потока к берегу под прямым углом.

Цель работы – оценка влияния угла атаки струи воды в диапазоне от 0° до 90° на скорость размыва пахотного горизонта чернозема.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного материала для исследований использовали пахотный горизонт легкоглинистого выщелоченного чернозема (Luvic Chernozem (Pachic)) из Воловского района Тульской области. Воздушно-сухую почву рассеивали на стандартном наборе сит, из фракции 1–2 мм отбирали навески для формирования образцов плотностью 1.3 г/см³. Эксперименты проводили с фракцией 1–2 мм, которая преобладает при сухом просеивании, поскольку в предыдущих исследованиях по изучению скорости размыва почвы использовали эту фракцию [5].

Навески почвы помещали в бюксы и увлажняли до 24%-ной влажности от массы воздушно-сухой почвы, что соответствует 55% от капиллярной

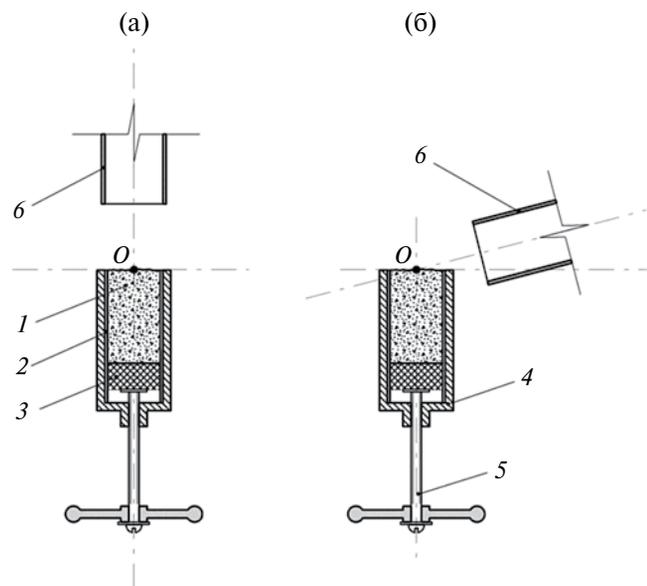


Рис. 1. Положение насадки напорного трубопровода относительно поверхности образца почвы при максимальном 90° (а) и минимальном 2° (б) углах атаки: 1 – образец почвы; 2 – кассета; 3 – плунжер; 4 – корпус кассетоприемника; 5 – подающий винт; 6 – насадка напорного трубопровода; O – точка пересечения оси водного потока с центром поверхности образца почвы.

влагоемкости, которую определяли для фракции 1–2 мм методом капиллярного насыщения в трубках. При такой влажности почва достигает предельной или близкой к ней консолидации [9]. После 16–18-часовой выдержки образец переносили на лист пергамина и тщательно перемешивали, а затем небольшими порциями укладывали в кассету с рабочим объемом $30 \times 17 \times 17$ мм. Каждую порцию почвы разравнивали в кассете и предварительно утрамбовывали до плотности, несколько

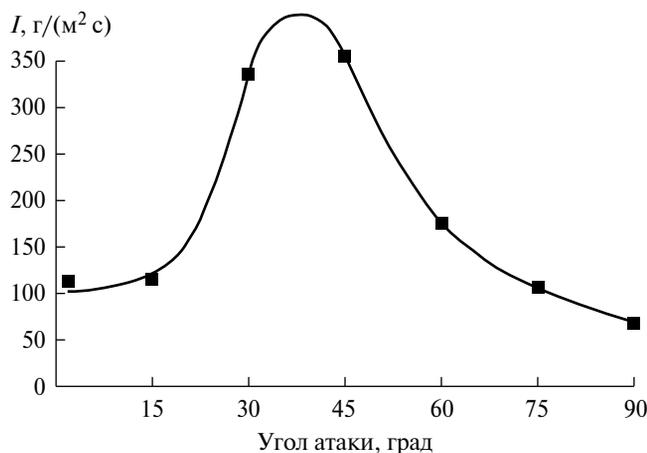


Рис. 2. Зависимость интенсивности размыва чернозема от угла атаки.

меньшей заданной величины (1.3 г/см^3). После укладки последней порции почвы в кассету ее устанавливали в ручной винтовой пресс и уплотняли до заданной плотности путем вращения винта до упора. При этом поверхность почвы приводили вровень с внешним краем кассеты. Кассету с образцом почвы устанавливали в контейнер и фиксировали в нем закрепительным винтом. По центру контейнера располагалась площадка толкателя, которая приводилась в движение с помощью подающего винта (рис. 1). По мере размыва почвы поверхность образца поддерживали на уровне края кассеты в продолжение всего эксперимента. Эксперимент продолжали до полного размыва образца. Начало и конец эксперимента фиксировали по секундомеру. Опыты проводили в 5–8-кратной повторности. Во всех вариантах опыта скорость истечения воды из насадки поддерживали на уровне 1.22 м/с .

При проведении экспериментов температура воды варьировала в диапазоне от 25 до 30°C , что было связано с отсутствием технических условий для поддержания комнатной температуры воды. В процессе обработки экспериментальных данных интенсивность размыва почвенных образцов приводили к средней температуре 27°C по эмпирической зависимости, полученной в предыдущих исследованиях [1].

Размыв образцов почвы струей воды проводили на специально сконструированной установке, пространственное положение насадки в которой изменяли от 0° до 90° .

Угол атаки устанавливали путем изменения наклона насадки. В первом варианте опыта угол атаки составлял 2° . Такой угол атаки был принят из опасения, что при нулевом угле атаки струя воды будет рикошетировать и отбрасываться от поверхности почвы. Далее угол атаки изменяли с шагом в 15° вплоть до 90° .

Интенсивность размыва рассчитывали путем деления массы образца на продолжительность размыва в секундах и приводили к площади, равной 1 м^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования приведены в табл. 1. Статистическая обработка результатов показывает, что вариабельность скорости размыва образцов находится в тех же пределах, что и в других наших исследованиях. Это можно рассматривать как свидетельство того, что механизм размыва почвы в данном эксперименте такой же, как и в более ранних исследованиях [1, 3]. Обращает на себя внимание, что максимальной скорости размыва почвы достигает при угле атаки около 45°

и уменьшается, как при уменьшении угла атаки, так и при его увеличении (рис. 2). Минимальная скорость размыва почвы наблюдается при угле атаки 90° , что в 5 раз меньше, чем максимальная скорость размыва.

Ранее показано [2], что разрушение связей между почвенными частицами при отсутствии внешнего механического давления и наличии свободной поровой воды происходит в результате расклинивающего действия той диффузной части пленок воды, которые образуются при гидратировании двойного электрического слоя (слой Гуи–Чепмэна). В процессе диффузии воды в эту пленку ее толщина увеличивается, стремясь к бесконечности. В результате частицы внешнего слоя отодвигаются от основной массы на расстояние заведомо большее, чем дальность действия межмолекулярных сил (< 50 нм) [7]. Их можно рассматривать как частицы, несвязанные с остальной массой почвы и свободно лежащие на поверхности образца. В этом случае поток, касательное напряжение которого на контакте с грунтом на три порядка меньше, чем сопротивление почвы разрыву [8], способен захватывать частицы, свободно лежащие на поверхности испытуемого образца. Из этого следует, что скорость размыва связного зернистого грунта при постоянной скорости потока и при прочих равных условиях зависит от темпов разрушения межагрегатных связей в поверхностном слое почвы, не испытывающем давления со стороны вышележащей почвенной массы, под действием свободной поровой воды.

Экспериментальным подтверждением этой гипотезы можно рассматривать практически линейную зависимость между скоростью размыва почвенных монозернистых образцов различной плотности и интенсивностью фильтрации воды через образцы [5]. Скорость и объем поступления воды в поверхностный слой почвы из водной струи зависит от угла атаки. Согласно рис. 3, оптимальные условия для поступления воды из струи в зернистый грунт складываются при угле атаки в 45° . В этом случае гидродинамический напор содействует продвижению воды вглубь грунтовой массы. При угле атаки в 90° части струи воды, попадающие в зазор между частицами верхнего слоя, теряют скорость напор уже при встрече со вторым слоем частиц грунта. В связи с этим вода медленнее и не столь глубоко проникает в почвенные образцы в процессе размыва и, следовательно, медленнее протекает разрушение межагрегатных связей, соответственно, пока они не нарушены, струя воды не способна срывать частицы грунта. Это одна из причин минимальной скорости размыва образцов при угле атаки 90° во всем диапазоне углов атаки.

Таблица 1. Интенсивность размыва почвенных образцов (I) при различных углах атаки

Угол атаки (α), град	n , шт.	I , г/(м ² с)	s , г/(м ² с)	C_v , %
2	6	113	37.0	34.4
15	5	115	20.9	34.8
30	5	336	77.1	22.9
45	6	356	92.7	26.0
60	8	175	45.2	25.8
75	5	108	38.8	36.1
90	5	68	45.9	67.6

Примечание. s – среднее квадратическое отклонение; C_v – коэффициент вариации; n – количество измерений.

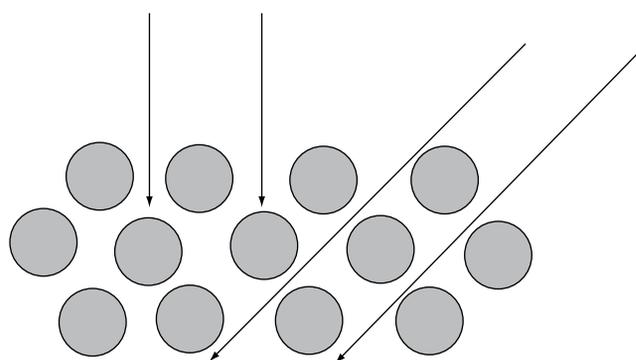


Рис. 3. Схема инерционного движения воды в почве при углах атаки 45° и 90° .

Другая причина обусловлена гидродинамическим давлением, которое оказывает струя воды на поверхность образца. В предыдущих экспериментальных исследованиях установлено, что гидростатическое давление сильно замедляет скорость размыва образцов связного грунта при прочих равных условиях. Это объясняется наличием адсорбированного на поверхности глинистых частиц слоя воды.

В основе адсорбции молекул воды лежит явление эпитахии, заключающееся в том, что молекулы воды адаптируются к поверхности адсорбционных центров на поверхности минеральных частиц за счет деформации водородных связей, образуя структурированную пленку воды, свойства которой существенно отличаются от свойств свободной воды. Вода в адсорбционной пленке не передает гидростатического давления, отличается повышенной в 3–5 раз вязкостью по сравнению со свободной водой и не обладает свойством взвешивания [7]. Первое свойство обеспечивает передачу гидростатического давления на уровне частиц глинистого грунта. Второе свойство замедляет диффузию свободной поровой воды в межагрегатное

пространство. Вместе эти факторы замедляют образование расклинивающей пленки воды между частицами в области двойного электрического слоя. Все это замедляет скорость разрушения межагрегатных связей в глинистом грунте, а без разрушения сцепления между частицами грунта их отрыв потоком невозможен, так как касательные напряжения на поверхности грунта, создаваемые водным потоком, на три порядка меньше, чем сила сцепления между частицами грунта [8]. В нашем случае, а именно при угле атаки в 90° , гидростатическое давление замещается гидродинамическим.

При малых углах атаки (2° – 15°) гидродинамическое давление можно не принимать во внимание. В этом случае впитывание воды в образец происходит под влиянием силы тяжести, капиллярных сил, которые проявляются при любых углах атаки, но в связи с достаточно высокой влажностью модельных образцов, вклад его в процесс разрушения межагрегатных связей и размыва грунта, вероятно, не очень значителен. Для оценки роли капиллярных сил в процессе размыва связных грунтов струей воды при различных углах атаки, вероятно, следует провести испытания такого рода при низкой исходной влажности образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Угол подхода струи воды к поверхности связного грунта оказывает большое влияние на скорость его размыва. Максимальная скорость размыва связного грунта наблюдается при углах атаки около 45° , а минимальная – при угле атаки в 90° . Скорости размыва между максимальными и минимальными значениями различаются более чем в 5 раз. Такое влияние угла атаки на скорость размыва связных грунтов связано с механизмом разрушения межагрегатных связей на периферии связных грунтов, где динамическое равновесие нарушено, поэтому в присутствии свободной поровой воды происходит разрушение межагрегатных связей между глинистыми частицами, что является начальным этапом в процессе размыва связных грунтов. А скорость проникновения воды в поверхностный слой связного грунта зависит от угла подхода струи воды к поверхности образца.

Благодарность. Работа выполнена по плану НИР Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Влияние температуры воды и влажности почвы на эродируемость образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896. doi: 10.7868/S0032180X14070107
2. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5. С. 593–598. doi: 10.7868/S0032180X16050117
3. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8. С. 995–999.
4. Ларионов Г.А., Гендугов В.М., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях // Почвоведение. 2008. № 3. С. 330–337.
5. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горбеев А.В., Судницын И.И. Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3. С. 354–359. doi: 10.7868/S0032180X17010099
6. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 115 с.
7. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.
8. Nearing M.A., Parker S.C., Bradford J.M., Elliot W.J. Tensile strength of thirty-three saturated repacked soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. V. 55. № 6. P. 1546–1551.
9. Nearing M.A., West L.T., Brown L.C. A Consolidation model for estimating changes in rill erodibility // Trans. of the ASAE. 1988. V. 31. № 3. P. 696–700.