

DOI

УДК 631.4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЧВОЗАЩИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СКЛОНОВЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ

С. И. Чучкалов, В. В. Алексеев, И. И. Максимов, Ю. Ф. Казаков, К. А. Хафизов

Реферат. Основная цель исследований – уточнение значений эрозионной стойкости почв. Существующие методы оценки эрозионной стойкости почв предусматривают изучение кинетической и потенциальной энергии водного потока. Уменьшение полной энергии в процессе течения по руслу связано с работой водного потока по разрушению и смыву почвы. Однако при этом не учитывается энергия капиллярных волн, существующих на поверхности воды при ламинарном течении. Их частота обычно такова, что волны не различимы невооруженным глазом и поэтому не учитываются, хотя энергия таких волн по величине сравнима с энергией потока. Необходимость уточнения эрозионной стойкости связана с возможностью оценить и учесть их энергию. Для этого разработана методика учета и оценки вклада энергии капиллярных волн в общую энергию микропотока воды, оказывающего разрушающее и размывающее воздействие на почву склонового агроландшафта. Методика основана на разработанной математической модели, которая позволила получить выражение для определения отношения энергии капиллярных волн, образующихся на поверхности водного потока, к кинетической энергии водного потока. Для экспериментального исследования процесса развития капиллярных волн на гладких и шероховатых поверхностях и определения режимных параметров была создана установка в виде лотка прямоугольного сечения с регулируемым углом наклона и интенсивности подачи воды, а также со сменными рабочими поверхностями. Геометрию микропотока и форму его поверхности определяли по результатам видеосъемки и показаниям лазерного дальномера. В исследуемом диапазоне скоростей волны от 0,28 до 0,46 м/с, длины волны – от 2,8 до 9,7 мм, глубины потока – от 0,7 до 3,1 мм численная оценка зависимости энергии капиллярных волн от кинетической энергии водного потока впервые выявила значительный (до 40...60%) вклад капиллярных волн, образующихся на поверхности микропотоков, к полной энергии водного потока.

Ключевые слова: эрозионная устойчивость почв, капиллярные волны, склоновые агроландшафты.

Введение. Склоновые агроландшафты – объекты подверженные повышенной эрозионной опасности [1, 2, 3]. Для защиты и сохранения свойств агроландшафта, касающихся плодородия почвы нужен не только контроль, но и точное прогнозирование процессов эрозии. Необходимо знать, какие величины мониторить, поскольку различные факторы оказывают разное влияние на способность почвы сопротивляться водной эрозии. Поскольку она преимущественно зависит от характеристик системы микропотоков воды, возникающих при таянии снега или выпадении осадков, то, естественно, необходимо выявлять и изучать их гидродинамические свойства. Такой подход позволяет создавать адекватные физические модели водной эрозии [4]. Возникающая на склоне система микропотоков воды непрерывно меняется, но ряд ее параметров остаются крайне стабильными и характеризуют поверхность склона, а также ее отклик на появление размывающих потоков. При определенных условиях микропоток обладает свойствами, разрушающими и транспортирующими почву, что особенно важно на стадии медленной равномерной эрозии [5].

Долгое время наиболее эффективным считался энергетический подход к количественному описанию эрозионной стойкости почв. В частности, для характеристики сопротивления ее поверхности эрозионному разрушению набегающим микропотоком была предложена величина эрозионной стойкости ψ [6], определяемая как энергия, необходимая

для разрушения и выноса единицы массы почвы в естественных условиях. Сейчас более эффективным считают использование величины удельной мощности потока, определяемой как энергию необходимую на разрушение и вынос из места естественного залегания единицы массы почвы за единицу времени:

$$\psi = E (t m)^{-1}, \quad (1)$$

где E – энергия (Дж), идущая на разрушение и вынос массы почвы m (кг) за время t (с).

Средняя глубина h (или ширина) микропотока связана с тремя характеристиками: расходом воды Q , м³/с, гравитационным компонентом gi (g – ускорение свободного падения, м/с², i – уклон), м/с² и эрозионной устойчивостью ψ , Дж/(кг·с) ≡ м²/с³. Как эрозионный смыв, так и отложения, приносимые потоком, на подстилающей поверхности, могут быть описаны безразмерной величиной \mathcal{E}_p , а также безразмерной величиной λ , играющей роль критерия Лохтина [7] в энергетической интерпретации [8]:

$$\mathcal{E}_p = h(gi)^3 \psi^{-2} \lambda = Qg^7 i^7 \psi^{-5}, \quad (2)$$

Эрозионная стойкость ψ , определяемая выражением (1), необходима для изучения связей критериев \mathcal{E}_p и λ , согласно выражениям (2), практическое использование которых было проиллюстрировано в работе [9].

В последние годы все большее внимание

уделяется влиянию на эрозию склоновых почв волнообразования в поверхностном стоке [10, 11]. Развитие технологий делает достаточно доступным обнаружение и фиксацию процесса развития и формирования волн различных типологий и параметров на поверхности жидкости [12, 13]. В качестве доминирующих факторов, влияющих на различные параметры волнения, выделены шероховатость поверхности почвы и наклон склона. Было показано, что взвешенные наносы могут уменьшить влияние ускорения катящихся волн на эрозию почвы, и это следует учитывать в ее моделях. В отношении энергетики процесса образования капиллярных волн на поверхности жидкости результаты исследований в основном касаются энергетического спектра капиллярных волн [14, 15], их пространственного затухания и диссипации [16, 17]. С энергетической точки зрения влияние волнообразования в водном потоке на эрозию склонов не рассматривалось.

Цель исследования – уточнение величины эрозионной стойкости путем оценки вклада энергии капиллярных волн, образующихся на поверхности микропотоков, в общую энергию водного потока, который оказывает разрушающее и размывающее воздействие на поверхность склона.

Для ее достижения решали следующие задачи: получить аналитические зависимости для отношения кинетической энергии водного потока и энергии капиллярных волн, образующихся на поверхности водного потока; экспериментально измерить и численно оценить требуемые параметры капиллярных волн и течения воды; провести численную оценку вклада энергии капиллярных волн в общую энергию водного потока.

Условия, материалы и методы. Среди множества вариантов реального протекания процессов разрушения почвы микропотоком для проведения исследований были выбраны наиболее характерные случаи: длина волны –

от 2 до 15 мм, глубина потока – от 1 до 20 мм, скорость волны – от 280 до 460 мм/с. В первом приближении можно ограничиться относительно слабым течением воды в неглубоком (< 2 см) микропотоке (рис. 1) и предположить, что энергия капиллярной волны пропорциональна только ее поверхностной энергии. Это позволяет оценить энергетический вклад капиллярных волн, определив площадь поверхности:

$$E = \sigma \iint dx dy ((1 + (dz/dx)^2 + (dz/dy)^2)^{1/2} - 1), \quad (3)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Рассмотрим поток волновой энергии как энергию, переносимую волной через поверхность поперечного сечения микропотока в единицу времени. Тогда объем водного потока, переносящий энергию, можно определить следующим образом:

$$V = Svt \quad (4)$$

где v – скорость волны (м/с), S – величина площади поперечного сечения микропотока (м²) и t – время (с), за которое заданный объем воды протекает через сечение.

Плотность энергии потока I можно определить как отношение энергии потока, которую несет волна к времени t через площадь S перпендикулярную направлению распространения волны и представляет собой векторную величину:

$$I = E(St)^{-1} = \langle w \rangle v = r \omega^2 A^2 v / 2 \quad (5)$$

где E – энергия капиллярных волн (Дж), определяемая выражением (3), I – средняя объемная плотность энергии волнового движения (Дж/(м²×с)), ρ – плотность жидкости (кг/м³), ω (рад×с⁻¹) и A (м) – циклическая частота и амплитуда волны соответственно.

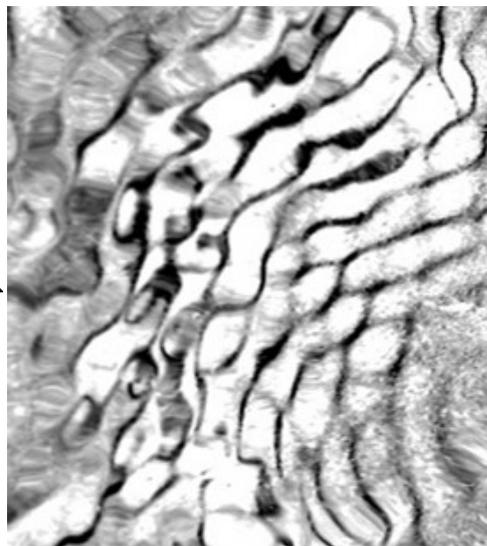
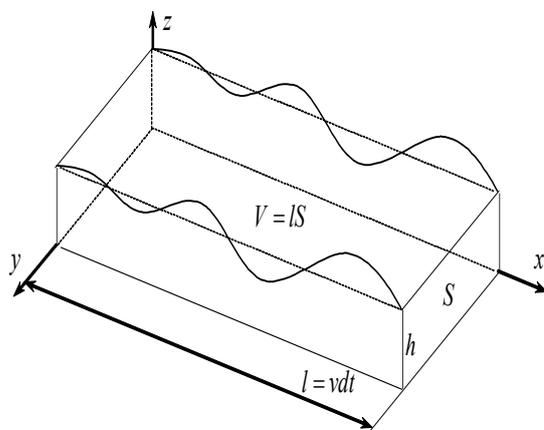


Рис. 1 – Развитие капиллярной волны на поверхности микропотока (схема и фотография)

Поскольку объем рассматриваемой жидкости мал, будем считать, что объемная плотность энергии постоянна. Поэтому, исходя из выражения (5), для средней энергии капиллярной волны в объеме V , определяемой формулой (4), можно записать:

$$E = r \omega^2 A^2 S t v / 2 \quad (6)$$

Зная плотность потока энергии, можно найти поток энергии через произвольную поверхность. Кинетическая энергия E^* движения массы воды m , содержащейся в том же рассматриваемом объеме V микропотока, текущего со средней скоростью v , может быть представлена в следующем виде:

$$E^* = m (vf)^2 / 2 = (vf)^2 \rho S t v / 2 \quad (7)$$

Соотношение значений выражений (6) и (7) позволяет оценить, во сколько раз энергия волны отличается от кинетической энергии водного потока:

$$E/E^* = (r\omega^2 A^2 S t v / 2) / ((vf)^2 \rho S t v / 2) = \omega^2 A^2 (vf)^{-2} \quad (8)$$

Оценка энергетического вклада капиллярных волн с использованием выражения (8) позволяет скорректировать величину эрозионной стойкости почвы, то есть рассчитать энергию, необходимую для разрушения и выноса единицы массы почвы в естественных условиях её положения в единицу времени с учетом процесса волнообразования на поверхности микропотока.

Для экспериментального исследования процесса развития капиллярных волн на гладких и шероховатых поверхностях и определения величин ω , A , h , а также длины волны λ в лабораторных условиях использовали установку в виде лотка прямоугольного сечения (рис. 2) с регулируемым углом наклона, интенсивности подачи воды и сменными рабочими поверхностями.

Скорость волны v рассчитывали по выражению [18]:

$$v = ((g/k + sk/r) \tanh kh)^{1/2}, \quad (9)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор.



Рис. 2 – Экспериментальная установка с «гладкой» (а) и «шероховатой» (б) поверхностями

Процесс волнообразования в экспериментальной ячейке регистрировали с соответствующим масштабированием путем видеосъемки цифровой видеокамерой GoPro HERO9. Геометрию микропотока и форму его поверхности определяли по результатам видеосъемки и показаниям лазерного дальномера.

Результаты и обсуждение. По итогам численного моделирования и видеосъемки процесса формирования и развития капиллярных волн (рис. 3) был выявлен ряд параметров, реализуемых в наших условиях (ω , A , S , v измерения которых реализованы в данном исследовании).

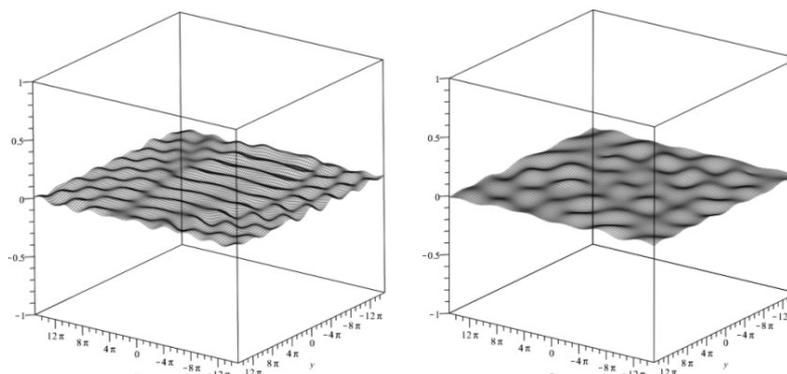


Рис. 3 – Моделирование поверхностных волн искусственно создаваемой поверхности микропотока

Скорость волны для наблюдаемого диапазона параметров $\lambda = 2,8 \dots 9,7$ мм, $h = 1,1$ мм, $2\rho h/\lambda = 0,58 \dots 6,2$ мм, рассчитанная по выражению (9), находилась в пределах от 0,28

до 0,46 м/с, диапазон изменения амплитуды волны – от 0 до 1,1 мм, частота волны – от 22 до 47 Гц, длина волны не превышала 7,4 мм (рис. 4).

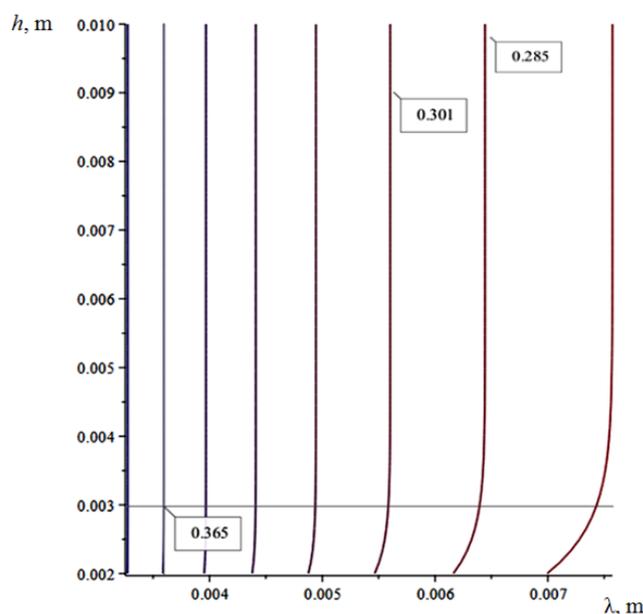


Рис. 4 – Зависимость скорости v (м/с) капиллярной волны от ее длины λ (м) и глубины h (м)

В исследованном диапазоне параметров режимов численные оценки энергии капиллярных волн в зависимости от кинетической энергии водного потока E/E^* по выражению (8) выявили существенный вклад капиллярных волн,

формирующихся на поверхности микропотоков, в полную энергии водного потока – до 47...63% (см. табл.).

Таким образом, кинетическая энергия потока без учета вклада энергии капиллярных волн примерно в 1,5 раза меньше.

Таблица - Результаты измерений и расчетов

Частота, Гц	Амплитуда, мм	Глубина, мм	Скорость микропотока, мм/с	E/E^*
23	0,307	2,119	269,05	0,051
23	0,614	2,119	269,05	0,174
23	1,125	2,119	269,05	0,471
27	0,409	2,119	262,91	0,082
27	0,614	2,119	262,91	0,256
27	0,921	2,119	262,91	0,634

Выводы. Принимая во внимание выявленную «многокомпонентность» полной энергии водного потока и сделанные поправки, можно пересмотреть граничные значения, позволяющие оценить устойчивость склоновых поверхностей почвы к вымыванию. Переоценке подлежат интервалы, при которых идет образование отложений и деформация русла, наблюдается равновесие системы «русло – микропоток воды», а также наблюдается смыв почвы и деформация русла водным потоком. Результаты исследования динамики поверхности микропотоков позволили оценить энергию капиллярных волн и долю их вклада в общую энергию водного потока. Для рассмотренных

случаев доля энергии достигала 46...62%.

Расчетные величины, полученные с использованием теоретических зависимостей, свидетельствуют о том, что вклад энергии капиллярных волн в общую энергию потока воды нельзя считать пренебрежимо малым при энергетическом анализе начальной стадии водной эрозии на склонах. То есть ее необходимо обязательно принимать во внимание при проектировании противоэрозионных мероприятий [19, 20]. В зависимости от уклона и особенностей микрорельефа почвы доля вклада энергии капиллярных волн может меняться, причем по мере уменьшения глубины и скорости микроручейка она возрастает.

Литература

1. Boardman J., Poesen J., Evans M. Slopes: Soil erosion // Geological Society London Memoirs. 2022. Vol. 58 (1). P. 241–255. doi:10.1144/M58-2021-4
 2. Лурье И.К., Лурье М.В. Моделирование 3D-изменений рельефа местности вследствие склоновой

- эрозии // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 3. С. 35–42. doi: 10.22389/0016-7126-2023-993-3-35-42
3. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 1. С. 37–46. doi: 10.31857/S2587556620010100
4. Pan C.Z., Shangguan Z.P. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics // Journal of Basic Science and Engineering. 2009. Vol. 17(6). P. 843–851. doi: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.06.004
5. Physical modelling of hydraulic erosion rates on loess slopes / H. Zheng, X.-A. Li, Y.-H. Deng, et al. // Water. 2022. Vol. 14(9). P. 1344. doi: 10.3390/w14091344
6. Chuchkalov S., Mikhailov B., Lvova M. and Alekseev V. Formation conditions and parameters of mini-landslides on agricultural slope landscapes // EBWFF 2023 - International Scientific Conference EBWFF. 2023. Vol. 420. Part 1. 03014. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/57/e3sconf_ebwff2023_03014/e3sconf_ebwff2023_03014.html (дата обращения: 15.08.2023). doi: 10.1051/e3sconf/202342003014
7. Чалов Р.С., Рулёва С.Н., Михайлова Н.М. Оценка морфодинамической сложности русла большой реки при планировании водохозяйственных мероприятий (на примере Оби) // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 29–37.
8. Сысуев В.А., Максимов И.И., Алексеев В.В., Максимов В.И. Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе трехмерных моделей // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 5. С. 63–66.
9. Development of a criteria-based approach to agroecological assessment of slope agrolandscapes / V. Alekseev, V. Maksimov, S. Chuchkalov, et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 6 (10(96)). P. 28–34. doi: 10.15587/1729-4061.2018.148623
10. Formation and coarsening of roll-waves in shear shallow water flows down an inclined rectangular channel / K.A. Ivanova, S.L. Gavriyuk, B. Nkonga, et al. // Computers and Fluids. 2017. Vol. 159. P. 189–203. doi: 10.1016/j.compfluid.2017.10.004
11. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope / C. Zhao, J. Gao, M. Zhang, et al. // Catena. 2015. Vol. 133. P. 394–402. doi: 10.1016/j.catena.2015.06.010
12. Capillary wave method: an alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction / A. Shmyrov, A. Mizev, A. Shmyrova, et al. // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31(1). P. 012101. doi: 10.1063/1.5060666
13. Slavchov R.I., Peychev B., Said I. A. Characterization of capillary waves: a review and a new optical method. // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33(10). P. 101303. URL: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/bitstream/123456789/74320/2/Ismail%20Characterization%20of%20capillary%202021%20Accepted.pdf> (дата обращения: 15.08.2023). doi: 10.1063/5.0066759
14. Bidirectional energy cascade in surface capillary waves / L.V. Abdurakhimov, A.A. Levchenko, I.A. Remizov, et al. // Physical Review E. 2015. Vol. 91(2). P. 023021. URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.91.023021> (дата обращения: 15.08.2023). doi: 10.1103/PhysRevE.91.023021
15. Tobisch E., Kartashov A. Energy spectra of ensemble of nonlinear capillary waves on a fluid // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. P. 1422. URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/jmse/jmse-09-01422/article_deploy/jmse-09-01422.pdf (дата обращения: 15.08.2023). doi: 10.3390/jmse9121422
16. Deike L., Berhanu E., Falcon E. Energy flux measurement from the dissipated energy in capillary wave turbulence // Physical Review E. 2014. Vol. 89(2). P. 023003. URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.89.023003> (дата обращения: 15.08.2023). doi: 10.1103/PhysRevE.89.023003
17. Effect of synthetic detergents on soil erosion resistance / S. Chuchkalov, I. Fadeev, V. Alekseev, et al. // KnE Life Sciences. 2020. Vol. 5(1). P. 489–496. doi: 10.18502/cls.v5i1.6113
18. Struff J.W. The Theory of Sound. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. Vol. 2. P.318
19. Противоэрозионная мелиорация в Республике Татарстан / М. М. Хисматуллин, А. Р. Валиев, М. М. Хисматуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17, № 2 (66). – С. 47-54. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-45-52.
20. Совершенствование методологии оценки последствий эрозии почвы в полевых экспериментах / Ю. П. Сухановский, А. В. Прущик, В. А. Выговтов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2022. – Т. 36, № 8. – С. 44-48. – DOI 10.53859/02352451_2022_36_8_44.

Сведения об авторах:

Чучкалов Сергей Иванович – старший преподаватель кафедры общей физики, e-mail: serg.chuchkaloff@yandex.ru

Алексеев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры общей физики, e-mail: av77@list.ru

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологические машины и комплексы, e-mail: maksimov48@inbox.ru

Казаков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: uga.kazakov@mail.ru

Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Россия

Хафизов Камиль Абдулхакович – доктор технических наук, заведующий кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

IMPROVING METHODS FOR DESIGNING SOIL PROTECTION TECHNOLOGIES ON SLOP AGRICULTURAL LANDSCAPE

S. I. Chuchkalov, V. V. Alekseev, I. I. Maksimov, Yu. F. Kazakov, K. A. Khafizov

Abstract. The main goal of the research is to clarify the values of soil erosion resistance. Existing methods for assessing the erosion resistance of soils involve studying the kinetic and potential energy of water flow. The decrease in

total energy during the flow along the channel is associated with the work of the water flow to destroy and wash away the soil. However, this does not take into account the energy of capillary waves existing on the surface of water during laminar flow. Their frequency is usually such that the waves are not visible to the naked eye and are therefore not taken into account, although the energy of such waves is comparable in magnitude to the energy of the flow. The need to clarify erosion resistance is associated with the ability to evaluate and take into account their energy. For this purpose, a methodology has been developed to take into account and evaluate the contribution of the energy of capillary waves to the total energy of the microflow of water, which has a destructive and erosive effect on the soil of a slope agricultural landscape. The technique is based on the developed mathematical model, which made it possible to obtain an expression for determining the ratio of the energy of capillary waves formed on the surface of a water flow to the kinetic energy of the water flow. To experimentally study the process of development of capillary waves on smooth and rough surfaces and determine the operating parameters, an installation was created in the form a rectangular tray with an adjustable angle of inclination and intensity of water supply, as well as with replaceable working surfaces. The geometry of the microflow and the shape of its surface were determined from the results of video recording and laser rangefinder readings. In the studied range of wave speeds from 0.28 to 0.46 m/s, wavelengths from 2.8 to 9.7 mm, flow depths from 0.7 to 3.1 mm, a numerical assessment of the dependence of the energy of capillary waves on the kinetic water flow energy revealed for the first time a significant (up to 40...60%) contribution of capillary waves formed on the surface of microflows to the total energy of the water flow.

Key words: erosion resistance of soils, capillary waves, slope agricultural landscapes.

References

1. Boardman J, Poesen J, Evans M. Slopes: soil erosion. Geological Society London Memoirs. 2022; Vol. 58(1). 241-255 p. doi:10.1144/M58-2021-4
2. Lur'e IK, Lur'e MV. [Modeling of 3D changes in terrain due to slope erosion]. Geodeziya i kartografiya. 2023; Vol.84. 3. 35-42 p. doi: 10.22389/0016-7126-2023-993-3-35-42
3. Kashutina EA, Yasinskii SV, Koronkevich NI. [Spring surface slope runoff on the Russian Plain in years of different water content]. Izvestiya Rossiiskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2020; 1. 37-46 p. doi: 10.31857/S2587556620010100
4. Pan CZ, Shanguan ZP. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics. Journal of Basic Science and Engineering. 2009; Vol.17(6). 843-851 p. doi: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.06.004
5. Zheng H, Li XA, Deng YH. Physical modelling of hydraulic erosion rates on loess slopes. Water. 2022; Vol.14(9). 1344 p. doi: 10.3390/w14091344
6. Chuchkalov S, Mikhaylov B, Lvova M, Alekseev V. Formation conditions and parameters of mini-landslides on agricultural slope landscapes. [Internet]. EBWFF 2023 - International Scientific Conference EBWFF. 2023; Vol.420. Part 1. 03014 p. [cited 2023, August 15]. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/57/e3sconf_ebwff2023_03014/e3sconf_ebwff2023_03014.html. doi: 10.1051/e3sconf/202342003014
7. Chalov RS, Ruleva SN, Mikhaylova NM. [Assessment of the morphodynamic complexity of a large river bed when planning water management measures (using the example of the Ob)]. Geografiya i prirodnye resursy. 2016; 1. 29-37 p.
8. Sysuev VA, Maksimov II, Alekseev VV, Maksimov VI. [Obtaining the basic hydrophysical characteristics of soils based on three-dimensional models]. Doklady Rossiiskoy akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk. 2013; 5. 63-66 p.
9. Alekseev V, Maksimov V, Chuchkalov S. Development of a criteria-based approach to agroecological assessment of slope agrolandscapes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018; Vol.6 10(96). 28-34 p. doi: 10.15587/1729-4061.2018.148623
10. Ivanova KA, Gavriyuk SL, Nkonga B. Formation and coarsening of roll-waves in shear shallow water flows down an inclined rectangular channel. Computers and fluids. 2017; Vol.159. 189-203 p. doi: 10.1016/j.compfluid.2017.10.004
11. Zhao C, Gao J, Zhang M. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope. Cate-na. 2015; Vol.133. 394-402 p. doi: 10.1016/j.catena.2015.06.010
12. Shmyrov A, Mizev A, Shmyrova A. Capillary wave method: an alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction. [Internet]. Physics of Fluids. 2019; Vol.31(1). 012101 p. doi: 10.1063/1.5060666
13. Slavchov RI, Peychev B., Said I. A. Characterization of capillary waves: a review and a new optical method. [Internet]. Physics of Fluids. 2021; Vol.33(10). 101303 p. [cited 2023, August 15]. Available from: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/bitstream/123456789/74320/2/Ismail%20Characterization%20of%20capillary%202021%20Accepted.pdf>. doi: 10.1063/5.0066759
14. Abdurakhimov LV, Levchenko AA, Remizov IA. Bidirectional energy cascade in surface capillary waves. [Internet]. Physical Review E. 2015; Vol.91(2). 023021 p. [cited 2023, August 15]. Available from: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.91.023021>. doi: 10.1103/PhysRevE.91.023021
15. Tobisch E, Kartashov A. Energy spectra of ensemble of nonlinear capillary waves on a fluid. [Internet]. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; Vol.9. 1422 p. [cited 2023, August 15]. Available from: https://mdpi-res.com/d_attachment/jmse/jmse-09-01422/article_deploy/jmse-09-01422.pdf. doi: 10.3390/jmse9121422
16. Deike L, Berhanu E, Falcon E. Energy flux measurement from the dissipated energy in capillary wave turbulence. [Internet]. Physical Review E. 2014; Vol.89(2). 023003 p. [cited 2023, August 15]. Available from: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.89.023003>. doi: 10.1103/PhysRevE.89.023003
17. Chuchkalov S, Fadeev I, Alekseev V. Effect of synthetic detergents on soil erosion resistance. KnE Life Sciences. 2020; Vol.5(1). 489-496 p. doi: 10.18502/kl.v5i1.6113
18. Struff JW. The theory of sound. Cambridge: Cambridge University Press, 2011; Vol.2. 318 p.
19. Khismatullin MM, Valiev AR, Khismatullin MM. [Anti-erosion reclamation in the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 2(66). 47-54 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-45-52.
20. Sukhanovskiy YuP, Prushchik AV, Vyvtovtov VA. [Improving the methodology for assessing the consequences of soil erosion in field experiments]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022; Vol.36. 8. 44-48 p. – DOI 10.53859/02352451_2022_36_8_44.

Authors:

Chuchkalov Sergey Ivanovich – senior lecturer of General Physics Department, e-mail: serg.chuchkaloff@yandex.ru
 Alekseev Viktor Vasilevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of General Physics Department, e-mail: av77@list.ru
 Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia
 Maksimov Ivan Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Transport and Technological Machines and Complexes Department, e-mail: maksimov48@inbox.ru
 Kazakov Yuriy Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Transport and Technological Machines and Complexes Department, e-mail: ura.kazakov@mail.ru
 Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia
 Khafizov Kamil Abdulkhovich - Doctor of Technical sciences, Head of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: fts-kgau@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.