

УДК 550.461

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОСТУЛАТОВ ФОРМАЛЬНОЙ КИНЕТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ

Мельникова Е.А., Лукашов С.В.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Брянск,
e-mail: sergelukashov@yandex.ru

В настоящей работе сделана попытка интерпретировать процессы водной эрозии с помощью постулатов формальной химической кинетики. Целью настоящей работы являлось исследование зависимости динамики склонового стока для построения кинетических кривых, описывающих процесс поверхностной эрозии. Показано, что взаимодействующими компонентами в эрозионном процессе можно считать подвергающийся эрозионному воздействию грунт, «исходное вещество», и эродированный, «продукт процесса». Обосновано, что построение кинетической модели смыва грунта под воздействием водного потока опирается на анализ предполагаемого механизма процесса и составление его схемы. Как любой физико-химический гетерогенный процесс, водная эрозия включает три одновременно протекающих стадии: перенос реагирующих веществ в зону реакции; химическое взаимодействие в зоне реакции; отвод продуктов реакции из зоны реакции. Самой медленной стадией процесса является смыв грунта, так как подвергающийся эрозионному воздействию грунт изначально находится в зоне воздействия водного потока. Исследована динамика зависимости склонового стока от времени, при этом установлено, что взаимодействие почвогрунтов с водой является лимитирующей стадией процесса и, следовательно, лежит в кинетической области. Предложена кинетическая модель описания эрозионного процесса грунта, в основе которой лежат постулаты формальной химической кинетики. Проведены исследования динамики склонового стока на песчаных и глинистых почвогрунтах. Для полученных экспериментальных данных построены линеаризованные графики динамики склонового стока. Хорошее схождение результатов расчетов с опытными данными при оценке процесса поверхностной эрозии на основе кинетической модели позволяет рекомендовать предлагаемую методику для прогнозирования эрозионных процессов.

Ключевые слова: водная эрозия, химическая кинетика, склоновый сток, динамика, скорость химической реакции, порядок реакции, гетерогенный процесс

USING THE POSTULATES OF FORMAL KINETICS TO DESCRIBE THE PROCESS OF SURFACE WATER EROSION

Melnikova E.A., Lukashov S.V.

Bryansk State Engineering-Technological University, Bryansk, e-mail: sergelukashov@yandex.ru

In this paper, an attempt is made to interpret processes water erosion using postulates formal chemical kinetics. The aim of this work was to study dependence slope flow dynamics for construction of kinetic curves describing process surface erosion. It is shown that interacting components in erosion process can be considered to exposed erosion soil, «starting material», and eroded, «product of process.» It is proved that construction of kinetic model soil flushing under influence of water flow is based on analysis proposed mechanism process and preparation of its scheme. Like any physical and chemical heterogeneous process, water erosion involves three simultaneous stages: transfer of reactants to reaction zone; chemical interaction in reaction zone; removal of reaction products from reaction zone. The slowest stage of process is flushing of soil, since soil exposed to erosion is initially in zone of water flow. The dynamics dependence of slope runoff on time was studied, and it was found that interaction of soils with water is limiting stage of process and, consequently, lies in kinetic region. The kinetic model description soil erosion process, which is based on the postulates of formal chemical kinetics, is proposed. Studies dynamics of slope runoff on sandy and clay soils were carried out. For the experimental data obtained, linearized graphs of the slope flow dynamics are constructed. A good convergence of calculation results with experimental data in assessment surface erosion process based on kinetic model allows us to recommend the proposed method for predicting erosion processes.

Keywords: water erosion, chemical kinetics, slope runoff, dynamics, rate of chemical reaction, reaction order, heterogeneous process

Водная эрозия – один из основных рельефообразующих факторов на земной поверхности. Интенсивность эрозионных процессов растет с каждым годом. Стремительно увеличиваются территории, подверженные разрушающему воздействию водной эрозии. Снижение негативного действия водной эрозии на почвенный покров – актуальная задача современности, для решения которой в настоящее время используются различные научные подходы

и методы, с различной степенью достоверности интерпретирующие процессы водной эрозии [1, 2].

На пахотных землях проявляется в основном поверхностная эрозия, ведущая к обеднению почвы гумусом и питательными веществами [3–5].

Вселенная живет по единым законам. Если предположить, что процессы поверхностной эрозии протекают по законам, аналогичным законам химической кинетики,

то их можно использовать для описания и прогнозирования эрозионных процессов.

Основным понятием в химической кинетике является понятие о скорости реакции. Химические реакции, которые протекают в гомогенных системах, называются гомогенными реакциями. Гетерогенные реакции – это химические реакции, которые протекают в гетерогенных системах. Водная эрозия почвогрунтов является гетерогенной реакцией, так как происходит на поверхности раздела фаз [6].

Любой гетерогенный физико-химический процесс можно представить из трех одновременно протекающих стадий: перенос реагирующих веществ в зону реакции; химическое взаимодействие в зоне реакции; отвод продуктов реакции из зоны реакции.

Если самым медленным процессом является подвод реагирующих веществ, то такие процессы идут в «диффузионной области». Если самой медленной стадией процесса является скорость взаимодействия компонентов, участвующих в процессе, то процесс протекает в «кинетической области» [6].

Взаимодействующими компонентами в эрозионном процессе можно считать подвергающийся эрозионному воздействию грунт, «исходное вещество», и эродированный, «продукт процесса». Медленной стадией процесса следует считать смыв грунта, так как подвергающийся эрозионному воздействию грунт изначально находится в зоне воздействия водного потока.

Важнейшие параметры кинетики – скорость и время протекания процесса. В формальной кинетике скорость химической реакции представляется в зависимости только от концентрации реагирующих веществ. Закономерности формальной кинетики позволяют определить кинетические параметры химической реакции [6].

Изменение концентрации от времени выражается кинетической кривой ($C = f(\tau)$). Крутизна кинетической кривой характеризует истинную скорость химической реакции в определенный момент времени. Кроме того, по кинетическим кривым можно определить порядок и константу скорости реакции [6].

Именно эти подходы, по мнению авторов, могут быть использованы при оценке процессов, происходящих при поверхностной эрозии.

Цель исследования: исследование зависимости склонового стока от времени для

построения кинетической модели, описывающей процесс поверхностной эрозии почвогрунтов.

Материалы и методы исследования

Для проверки выдвигаемой гипотезы в предпринимаемых исследованиях в качестве основополагающего был использован индуктивный метод, базирующийся на анализе экспериментальных данных, полученных на физической модели процесса водной эрозии. Процесс смыва грунта моделировали, используя лабораторную дождевальную установку типа ЛДУ-1М малых габаритов, которая пригодна для работы в условиях небольших лабораторий [7]. Исследовались почвогрунты, взятые в бассейне р. Сеща Дубровского района.

Результаты исследования и их обсуждение

Построение кинетической модели смыва грунта под воздействием водного потока опирается на анализ предполагаемого механизма процесса и составление его схемы. Схема должна отражать возможные стадии перехода исходного вещества системы – грунт в естественном состоянии – в смывтый в результате водной эрозии грунт и учитывать на данном уровне абстрагирования основные характерные черты описываемого процесса.

Предположим, что все изменения в системе «грунт – внешняя среда» происходят в результате взаимодействия только двух обобщенных кинетических единиц – грунт в естественном состоянии и смывтый в результате водной эрозии грунт:



где G , Ω – количество исходного и смывтого в результате эрозии грунта.

В качестве параметра концентрации использовался показатель Ψ , определяемый по формуле [8]:

$$\Psi = \pm \frac{\Omega_{t+\Delta t} - \Omega_t}{\Omega_{t+\Delta t}}, \quad (2)$$

где Ω_t , $\Omega_{t+\Delta t}$ – склоновый сток к моментам времени t и $t+\Delta t$; Δt – временной интервал, через который производились замеры.

Динамика склонового стока представлена в таблице.

Порядок реакции определяли графически. Для этого строили графики в координатах $\Psi - t$, $\ln|\Psi| - t$, $1/\Psi - t$, $1/\Psi^2 - t$, соответствующие нулевому, первому, второму и третьему порядкам реакции. Полученные данные представлены на рис. 1 и 2.

Динамика склонового стока на песчаных и глинистых почвогрунтах

Песчаные почвогрунты (пойма реки Сейца Дубровского района Брянской области)			Глинистые почвогрунты (пойма реки Сейца Дубровского района Брянской области)		
Ω	t	Υ	Ω	t	Υ
1906	6	0,35	1380	12	0,02
1416	12	0,39	1350	18	0,02
1016	18	0,34	1320	24	0,03
756	24	0,36	1280	30	0,03
556	30	0,33	1240	36	0,03
418	36	0,51	1200	42	0,04
276	42	0,34	1150	48	0,06
206	48	1,06	1090	54	0,09
100	54	0,66	1000	60	0,11
60	60	0,66	900	66	0,14
—	—	—	790	72	0,16
—	—	—	680	78	0,21
—	—	—	560	84	0,21
—	—	—	440	90	0,13
—	—	—	390	96	0,34
—	—	—	290	102	0,26
—	—	—	230	108	0,26

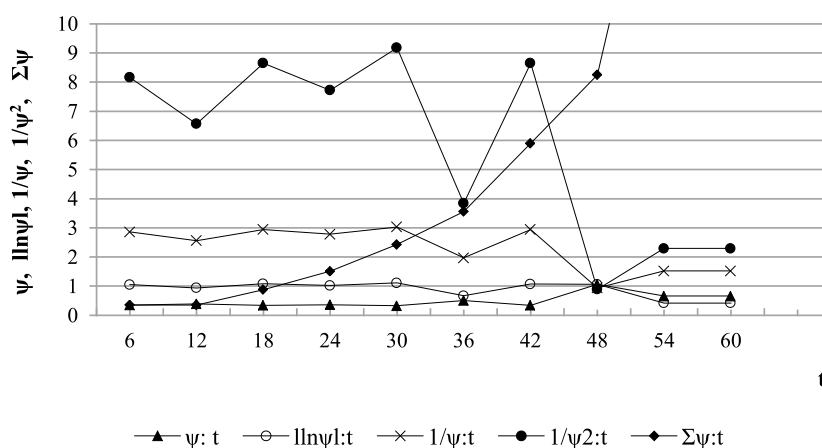


Рис. 1. Динамика склонового стока на песчаных почвогрунтах (пойма реки Сейца в Дубровском районе Брянской области)

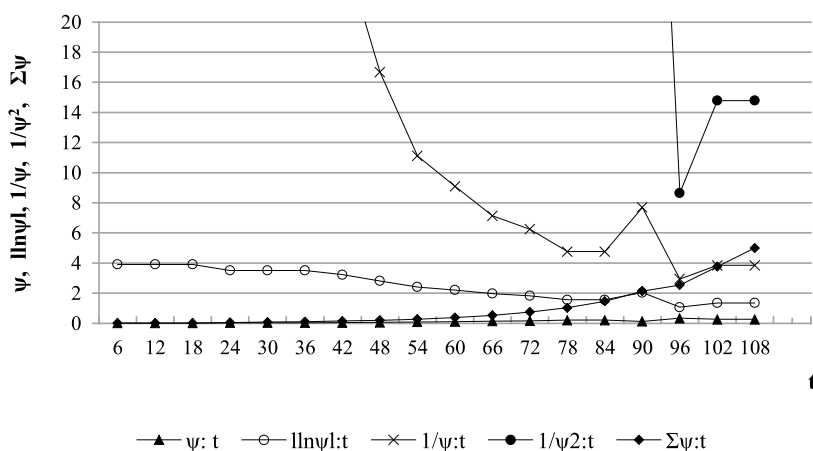


Рис. 2. Динамика склонового стока на глинистых почвогрунтах (пойма реки Сейца в Дубровском районе Брянской области)

Как видно из данных, представленных на рис. 1 и 2, функции приближаются к линейной форме для зависимостей $\Psi(t)$ и $\Sigma\Psi(t)$ в интервале времени 30–50 с, что соответствует нулевому порядку реакции. Нулевой порядок характерен для гетерогенных реакций в том случае, если скорость диффузии реагентов к поверхности раздела фаз меньше скорости их химического превращения. Таким образом, лимитирующей стадией процесса следует считать смыл грунта, так как подвергающийся эрозионному воздействию грунт изначально находится в зоне воздействия водного потока.

Для того, чтобы предсказать изменение объема подвергнувшегося эрозии грунта в любой момент времени, необходимо определить:

Ω_0 – склоновый сток в начальный момент времени относительно оси отсчета;

Ω_{CT} – склоновый сток в момент стабилизации процесса относительно той же оси;

μ – комплексный параметр, характеризующий максимальную удельную скорость изменения количества подвергнувшегося эрозии грунта.

Для нахождения Ω_0 , Ω_{CT} , μ необходимо полученные экспериментальные данные, через равные промежутки времени, нанести на график с ординатой Ψ и с абсциссой Ω_t . Для нахождения Ω_0 , определяющего положение оси отсчета 0–0, нужно задаться сначала значением $\Omega_0 = 0$, а затем, постепенно увеличивая его методом последовательных приближений, добиться на графике совершенной линейной зависимости Ψ от Ω_t .

После преобразования кривых изменения количества подвергнувшегося эрозии грунта прямую линию продолжают до пересечения с осью абсцисс и осью ординат. На оси ординат получится отрезок, численно равный $\Psi_\mu = 1 - e^{-\mu G \Delta t}$, а на оси абсцисс – отрезок Ω_{CT} . Зная временной интервал Δt ,

можно найти $\mu G_m = \frac{\ln(1 - \Psi_\mu)}{\Delta t}$ [9]. Полу-

ченные данные для песчаных и глинистых почвогрунтов представлены на рис. 3.

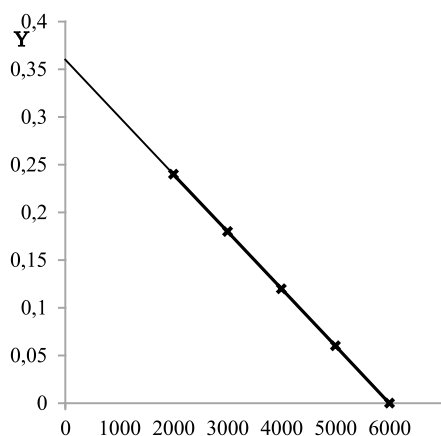
Как видно из данных, представленных на рис. 3, совершенная линейаризация кинетических кривых изменения объема различных почвогрунтов, подвергнувшихся эрозии, свидетельствует о возможности описания процесса кинетическими моделями.

В течение всего периода протекания процесса эрозии μG_m , Ω_0 не изменяются и могут использоваться для определения координат кинетической кривой, характеризующей эрозионный процесс, используя зависимость

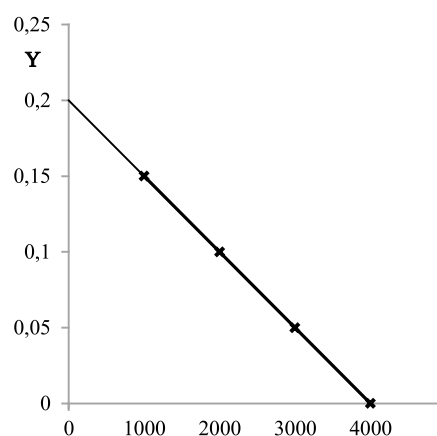
$$\Omega_t = \frac{\Omega_{\infty t}}{1 + \frac{\Omega_{\infty} - \Omega_0}{\Omega_0} e^{-\mu G \Delta t}}, \quad (3)$$

где Ω_{∞} – максимальный склоновый сток, который может наблюдаться в результате эрозионного процесса.

$$\Omega_{\infty} = \frac{\Omega_{CT} \mu G_m}{\mu G_m}. \quad (4)$$



а)



б)

Рис. 3. Линейаризованные графики зависимости динамики склонового стока: а) песчаные почвогрунты, б) глинистые почвогрунты

Продолжительность протекания процесса эрозии до полного затухания можно определить по зависимости [10, 11]:

$$t = \frac{1}{\mu G_m} \ln \frac{\Omega_k (\Omega_0 - \Omega_{CT})}{\Omega_0 (\Omega_k - \Omega_{CT})}, \quad (5)$$

где Ω_k – склоновый сток в конце временного периода;

Ω_{CT} – склоновый сток в стационарном периоде процесса.

Если принять $\Omega_k/\Omega_{CT} = n$, а $n = 0,95$, так как при $n > 0,95$ продолжительность процесса увеличивается, а интенсивность резко снижается, то можно прогнозировать продолжительность протекания исследуемого процесса. Оптимальное значение n следует устанавливать в каждом конкретном случае (в зависимости от условий протекания процесса и поставленных задач).

После некоторых преобразований зависимость (5) приобретает вид

$$t = \frac{1}{\eta_1 G_m} \ln \left(\frac{\Omega_{CT} - \Omega_0}{\Omega_0} \cdot \frac{n}{1-n} \right). \quad (6)$$

Выводы

1. В процессе проведенных исследований установлено, что постулаты формальной химической кинетики могут быть использованы для описания процессов водной эрозии почвогрунтов.

2. Предложена кинетическая модель описания эрозионного процесса грунта, в основе которой лежат постулаты формальной химической кинетики.

3. Хорошее схождение результатов расчетов с опытными данными при оценке процесса поверхностной эрозии позволяет рекомендовать методику, основанную на кинетических моделях для прогнозирования эрозионных процессов.

Список литературы / References

1. Эрозия почвы // ECOPORTAL [Электронный ресурс]. URL: <https://ecoportal.info/eroziya-pochvy/> (дата обращения: 15.12.2018).

Soil erosion // ECOPORTAL [Electronic resource]. URL: <https://ecoportal.info/eroziya-pochvy/> (date of access: 15.12.2018) (in Russian).

2. Писаренко В.Н., Писаренко П.В., Писаренко В.В. Охрана почвенного покрова: негативные последствия ветровой и водной эрозии почв // Agro Mage [Электронный ресурс]. URL: https://agromage.com/stat_id.php?id=538 (дата обращения: 15.12.2018).

Pisarenko V.N., Pisarenko P.V., Pisarenko V.V. Protection of a soil cover: negative consequences of a wind and water erosion of soils // Agro Mage [Electronic resource]. URL: https://agromage.com/stat_id.php?id=538 (date of access: 15.12.2018) (in Russian).

3. Гресков П.Н. Эффективность гидропосева Profile для защиты склонов от эрозии // Инженерная защита. 2014. № 1. С. 34–37.

Greskov P.N. Effectiveness of hydrocrops of Profile for protection of slopes against an erosion // Inzhenernaya Zashchita. 2014. № 1. P. 34–37 (in Russian).

4. Точицкий А.А., Лепешкин Н.Д. Защитим почву на склоновых землях [Электронный ресурс]. URL: <https://belagromech.by/articles/zashhitim-pochvu-na-sklonovyh-zemlyah/> (дата обращения: 15.12.2018).

Tochitsky A.A., Lepeshkin N.D. Let's protect the soil on slope lands // RUP «NPTs NAN of Belarus on Mechanization of Agriculture» [Electronic resource]. URL: <https://belagromech.by/articles/zashhitim-pochvu-na-sklonovyh-zemlyah/> (date of access: 15.12.2018) (in Russian).

5. Геологический словарь: в 3 т. / Гл. ред. О.В. Петров. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. Т.3. 435 с.

Geological dictionary: in 3 t. / Chapter of an edition O.V. Petrov. The 3rd prod., the reslave. and additional. SPb.: VSEGEI, 2012. T. 3. 435 p. (in Russian).

6. Беспалова Ж.И., Смирнова Н.В., Пятёрко И.А., Кудрявцев Ю.Д. Химическая кинетика и катализ: учебное пособие по курсу «Физическая химия». Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2014. 98 с.

Bespalova Z.I., Smirnova N.V., Pyaterko I.A., Kudryavtsev Yu.D. Chemical kinetics and catalysis: manual at the rate «Physical chemistry». Novocherkassk: YuRGPU (NPI), 2014. 98 p. (in Russian).

7. Комиссаров М.А. Эрозия почвы при орошении мобильными дождевальными установками // Мелиорация и водное хозяйство. 2011. № 3. С. 32–34.

Komissarov M. A. Soil erosion during mobile sprinklers irrigation. 2011. № 3. P. 32–34 (in Russian).

8. Мищенко А.Е. Стабильность эрозионно-опасного склона // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 5 (43). С. 17–20.

Mishchenko A.E. Stability of an erosive and dangerous slope // News of the Orenburg state agricultural university. 2013. № 5 (43). P. 17–20 (in Russian).

9. Василенков В.Ф., Мельникова Е.А. К построению модели движения жидкости в ненасыщенной почве при испарении // Достижения науки и передовой опыт в производстве и учебно-воспитательный процесс: материалы межвузовской научно-практической конф. Брянск, 1995. С. 57–58.

Vasilenkov V.F., Melnikova E.A. To creation of model of flow of fluid in the nonsaturated soil at evaporation // Achievements of science and the best practices in production and teaching and educational process: materials interuniversity scientific and practical. Bryansk, 1995. P. 57–58 (in Russian).

10. Василенков В.Ф. О применении кинетических моделей в мелиорации // Пути повышения продуктивности полей и ферм: сб. тезисы докладов научной конф. Рязань, 1989. С. 113–115.

Vasilenkov V.F. About application of kinetic models in melioration // Paths of increase in efficiency of fields and farms: Sb. Theses of reports scientific. Ryazan, 1989. P. 113–115 (in Russian).

11. Василенков В.Ф., Василенков С.В., Демина О.Н., Мажайский Ю.А., Мельникова Е.А. Экологическая и экономическая оптимизация эксплуатационного режима орошения современными дождевальными машинами // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2015. № 4 (28). С. 85–93.

Vasilenkov V.F., Vasilenkov S.V., Dyomina O.N., Magaiskiy Yu.F., Melnikova E.A. Ecological and economic optimization of the operational mode of an irrigation by the modern dozhdevalny cars // Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named After P.A. Kostychev. 2015. № 4 (28). P. 85–93 (in Russian).