1. ПОЧВЕННЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 631.459.23

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЕФЛЯЦИИ ПОЧВ

А.Ф. Черныш, Н.А. Лихацевич
Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

При изучении любого процесса конечной целью является построение теории, основанной на известных законах природы. Однако не всегда удается быстро свести выявленные при исследованиях закономерности к известным общим законам. Поэтому часто исследователи вынуждены ограничивать обобщение полученных опытных данных на уровне эмпирических моделей или, что рангом ниже, эмпирических уравнений. Эмпирические модели, в отличие от эмпирических уравнений, позволительно отнести к закономерностям, из которых представляется возможным получать более частны е зависимости.

В изучении дефляции (процесса выдувания почвы воздушным потоком) в настоящее время достигнут уровень построения эмпирических моделей и выполняется их обоснование с использованием результатов полевых и лабораторных исследований. Авторами новейшей «экспоненциальной» модели дефляции являются В.М. Гендугов и Г.П. Глазунов, использовавшие в своих аналитических исследованиях опытные данные по выдуванию почвы, полученные в аэродинамической трубе. В основу этой модели авторы поместили эмпирическое уравнение, названное ими «эмпирическим законом выдувания», или «нуль-моделью выдувания почвы» [1]:

$$\ln B = \beta - \alpha \frac{u_K^2}{u^2} \quad , \tag{1}$$

где $\ln$ – знак натурального логарифма; B – параметр массообмена (безразмерный комплекс, обобщенно характеризующий основные показатели дефляции)

$$B = q\frac{u}{\tau}, \tag{2}$$

где q – интенсивность выдувания почвы (кг/м^{2}с) при фактической скорости воздушного потока; u – фактическая скорость воздушного потока (м/с), измеренная выше слоя шероховатости; τ – касательное напряжение трения, вызываемое ветром на поверхности почвы (Н/м^2); u_K – критическая (по В.М. Гендугову и Г.П. Глазунову) скорость воздушного потока (м/с); α и β – эмпирические коэффициенты, отражающие влияние свойств почвы и воздушного потока на показатели эрозии (безразмерные величины).

На наш взгляд, модели (1) больше соответствует название «экспоненциальная», поскольку она получена путем логарифмирования экспоненциальной функции:

$$B = \exp\left(\beta - \alpha\frac{u_K^2}{u^2}\right). \tag{3}$$

Комплексный показатель B в (2) обобщенно характеризует процесс выдувания почвы. Однако при анализе процесса дефляции интерес представляет, прежде всего, интенсивность выдувания, которую можно получить из зависимостей (2) и (3) путем несложных преобразований.

Например, при критической скорости (u_K) из (3) следует

$$B_K = \exp(\beta - \alpha), \tag{4}$$

где B_K – величина параметра массообмена при критической скорости воздушного потока.

Из отношения (3) к (4) получим:

$$\frac{B}{B_K} = \frac{\exp(\beta - \alpha\frac{u_K^2}{u^2})}{\exp(\beta - \alpha)} = \exp\left[-\alpha(\frac{u_K^2}{u^2} - 1)\right]. \tag{5}$$

С учетом (2) из (5) вытекает расчетное уравнение для определения интенсивности дефляции:

$$q = B_K\frac{\tau}{u}\exp\left[-\alpha(\frac{u_K^2}{u^2} - 1)\right]. \tag{6}$$

Подобное уравнение В.М. Гендугов и Г.П. Глазунов приводят в своей монографии [1] на с. 152, но в несколько усложненном виде:

$$q = (\mu + 1)\psi B_{KQ}\frac{\tau}{u}\exp\left[-\theta(\frac{u_K^2}{u^2} - 1)\right], \tag{7}$$

где μ, ψ, B_{KQ}, θ – эмпирические параметры, дополнительно введенные авторами в модель дефляции для более точного учета особенностей конкретных почвенных поверхностей.

Несмотря на упрощение (6) относительно формулы (7), практическое использование предложенных В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым «нуль-модели выдувания почвы» (1) и его следствий (6), (7) требует определения ряда эмпирических параметров, физический смысл которых сложно увязать с известными почвенными характеристиками. Не случайно для одной и той же почвы, например, темно-каштановой, приведенные в монографии [1] (табл. 4.1.2) значения параметра B_K изменяются от 3,1 до 25, а эмпирический коэффициент α колеблется в пределах от 3,3 до 12,5. Причем отсутствует какая-либо корреляционная связь между этими параметрами. Аналогичный вывод справедлив и для других типов почв, эмпирические параметры для которых приведены в указанной таблице [1]. Поэтому применение выводов, вытекающих из «экспоненциальной» модели дефляции

В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, при оценке выдувания почвы воздушным потоком в условиях Беларуси наталкивается на ряд принципиальных трудностей, для разрешения которых требуются постановки собственных опытов в аэродинамической трубе, что, во-первых, трудноосуществимо, а во–вторых, малопродуктивно по причине присутствия в модели нескольких эмпирических параметров, изменяющихся по неустановленным законам.

В связи с возникшими трудностями мы попытались максимально упростить математическое представление дефляции и предложить собственный вариант ее моделирования, проверив его адекватность на экспериментальном материале В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова с использованием данных по выдуванию, полученных в аэродинамической трубе на разных почвенных поверхностях [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рабочей гипотезой явилось предположение о том, что интенсивность выдувания почвы связана со скоростью воздушного потока не экспоненциальной, а степенной зависимостью, т.е. имеет место закономерность:

$$\frac{q}{(u-u_{Н\Phi})^n}=const, \tag{8}$$

где $u_{Н\Phi}$ – начальная фиксированная скорость воздушного потока; n – эмпирический показатель степени, зависящий от величины начальной фиксированной скорости воздушного потока, т.е. $n=f(u_{Н\Phi})$.

Следствием уравнения (8), которое назовем «степенной» моделью дефляции, является формула, которую можно использовать при расчете интенсивности дефляции:

$$q=q_{\Phi}\left(\frac{u-u_{Н\Phi}}{u_{\Phi}-u_{Н\Phi}}\right)^n, \tag{9}$$

где q_{ϕ} – фиксированная интенсивность выдувания, соответствующая некоторой фиксированной скорости u_{Φ}.

При использовании «степенной» модели дефляции (8) и расчетной формулы (9) необходимо учитывать ограничения

$$u_0 < u_{Н\Phi} < u_{\Phi} < u_{m\Phi}, \tag{10}$$

где u_0 – пороговая скорость ветра, с которой начинает проявляться касательное напряжение трения, вызванное воздушным потоком на поверхности почвы (для свободных от растительности почвенных поверхностей предположительно u_0=4м/с, [2]); $u_{m\Phi}$ – максимальная фиксированная для данной почвы скорость воздушного потока.

В качестве максимальной фиксированной скорости воздушного потока ($u_{m\Phi}$) может быть принята, например, так называемая «разрушающая» для данной почвы скорость ветра. А в качестве фиксированной скорости воздушного потока (u_{Φ}) можно использовать, следуя рекомендации В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, «критическую» скорость ветра ($u_{К}$).

Заметим, что расчетное уравнение (9) охватывает всю область возможных скоростей воздушного потока (10), которые могут вызвать дефляцию почвы (от пороговой (u_0) до разрушающей (u_P) скорости). Что касается «экспоненциальной» модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, то уравнение (1) справедливо только при $u \geq u_K$, т.е. в более узком диапазоне.

Уравнение (9) является основным в «степенной» модели дефляции. Проверим его соответствие экспериментальным данным В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова. В монографии [1, с. 205, рис. 11.3.2)] приведен типичный вид экспериментальной зависимости *q=f(u)* на примере образца песчаной почвы, обработанной кондиционером. Обобщая полученный результат, авторы опыта указывают, что «…графики зависимости интенсивности выдувания от скорости воздушного потока **во всех случаях имеют вид параболических кривых**» (подчеркнуто нами). Причем форма параболы сохраняется в диапазоне от некоторой скорости ветра, отмеченной в [1] (со ссылкой на исследования Bagnold R.A.) как «несдвигающая» скорость, до так называемой «разрушающей» скорости, при которой происходит полное разрушение целостности почвенной поверхности (например, для анализируемого образца срыв защитного покрытия и разрушение почвы произошли по утверждению В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова при u_P=33 м/с [1]).

Для упрощения анализа придадим расчетным уравнениям линейную форму путем логарифмирования.

Для формулы В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (6):

$$\ln q = \left[\alpha + \ln\left(B_K \frac{\tau}{u}\right)\right] - \alpha \frac{u_K^2}{u^2}. \qquad (11)$$

Для формулы (9):

$$\ln q = \ln \frac{q_\Phi}{\left(u_\Phi - u_{H\Phi}\right)^n} + n \ln\left(u - u_{H\Phi}\right). \qquad (12)$$

Отождествляя начальную фиксированную скорость с разными значениями (от нуля до близких к наблюдаемым максимальным скоростям воздушного потока), можно получить ряд линейных уравнений вида:

$$y = N + nx, \qquad (13)$$

где y – в (11) и (12) *y=ln q*; N – так называемый «свободный» член уравнения (13), в качестве которого у В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (11) принимается $N = \left[\alpha + \ln\left(B_K \frac{\tau}{u}\right)\right]$, а в уравнении (12) $N = \ln \frac{q_\Phi}{\left(u_\Phi - u_{H\Phi}\right)^n}$; *n* – коэффициент пропорциональности в (12), (13), который аналогичен эмпирическому коэффициенту α в (11), т.е. у В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова $n = \alpha$; x – аргумент функции (13), в качестве которого в (11) принимается отношение $x=u^2/u^2$, а в (12) – $x=\ln(u-u_{H\Phi})$.

В таблице 1 для обработанного кондиционером образца песчаной почвы приведен расчет исходных показателей, использованных для построения графиков функции (13) на рис. 1 при различных значениях начальной фиксированной скорости ($u_{H\Phi}$).

График на рис. 1а соответствует формуле (11). Графики на рис. 1*б*…1*к* построены по зависимости (12), преобразованной в линейную форму (13). Коэффициенты регрессии полученных линейных уравнений, аппроксимирующих опытные точки на рис. 1, подтверждают предположение о взаимосвязи эмпирического показателя степени (n) и начальной фиксированной скорости воздушного потока ($u_{НФ}$).

Таблица 1

Расчет показателей в модели выдувания почвы (8), (9) при различных значениях фиксированной начальной скорости воздушного потока на основе опытных данных В.М. Гедугова и Г.П. Глазунова [1]

u, м/с	q, кг/(м^{2}с)	u^2	$u_к^2/u^2$	ln q	ln u	u–4	ln (u–4)	u–8	ln (u–8)	u–14
15,5	0,000002	240,25	0,266389	–13,12	2,74084	11,5	2,44235	7,5	2,014903	1,5
16,4	0,000011	268,96	0,237954	–11,42	2,79728	12,4	2,51770	8,4	2,128232	2,4
17,2	0,000010	295,84	0,216333	–11,51	2,84491	13,2	2,58022	9,2	2,219203	3,2
18,0	0,000012	324,00	0,197531	–11,33	2,89037	14,0	2,63906	10,0	2,302585	4,0
18,6	0,000030	345,96	0,184992	–10,41	2,92316	14,6	2,68102	10,6	2,360854	4,6
19,6	0,000028	384,16	0,166597	–10,48	2,97553	15,6	2,74727	11,6	2,451005	5,6
20,4	0,000033	416,16	0,153787	–10,32	3,01553	16,4	2,79728	12,4	2,517696	6,4
21,8	0,000050	475,24	0,134669	–9,90	3,08191	17,8	2,87920	13,8	2,624669	7,8
23,5	0,000142	552,25	0,115890	–8,86	3,15700	19,5	2,97041	15,5	2,740840	9,5
25,1	0,000155	630,01	0,101586	–8,77	3,22287	21,1	3,04927	17,1	2,839078	11,1
26,7	0,000130	712,89	0,089775	–8,95	3,28466	22,7	3,12236	18,7	2,928524	12,7
28,5	0,000244	812,25	0,078793	–8,32	3,34990	24,5	3,19867	20,5	3,020425	14,5
31,0	0,000355	961,00	0,066597	–7,94	3,43399	27,0	3,295884	23,0	3,135494	17,0

Продолжение таблицы 1

ln (u–14)	u–16	ln (u–16)	u–17	ln (u–17)	u–18	ln (u–18)	u–20	ln (u–20)	u–24	ln (u–24)
0,405465	–0,5	–	–1,5	–	–2,5	–	–4,5	–	–8,5	–
0,875469	0,4	–0,916290	–0,6	–	–1,6	–	–3,6	–	–7,6	–
1,163151	1,2	0,182322	0,2	–1,60944	–0,8	–	–2,8	–	–6,8	–
1,386294	2	0,693147	1,0	0,00000	0,0	–	–2,0	–	–6	–
1,526056	2,6	0,955511	1,6	0,47000	0,6	–,051083	–1,4	–	–5,4	–
1,722767	3,6	1,280934	2,6	0,95551	1,6	0,47000	–0,4	–	–4,4	–
1,856298	4,4	1,481605	3,4	1,22378	2,4	0,87547	0,4	–0,91629	–3,6	–
2,054124	5,8	1,757858	4,8	1,56862	3,8	1,33500	1,8	0,587787	–2,2	–
2,251292	7,5	2,074903	6,5	1,87180	5,5	1,70475	3,5	1,252763	–0,5	–
2,406945	9,1	2,208274	8,1	2,09186	7,1	1,96009	5,1	1,629241	1,1	0,095310
2,541602	10,7	2,370244	9,7	2,27213	8,7	2,16332	6,7	1,902108	2,7	0,993252
2,674149	12,5	2,525729	11,5	2,44235	10,5	2,35138	8,5	2,140066	4,5	1,504077
2,833213	15	2,708050	14,0	2,63906	13,0	2,56495	11,0	2,397895	7	1,945910

Значения коэффициентов детерминации, приведенные на рис. 1а и рис. 1б…1д, показывают, что наиболее тесную связь с опытными точками имеет функция (13) при $u_{НФ}$=14м/с и n=2. Если для формулы В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова показатель этой связи R^2=0,957, то для формул (9), (12) при $u_{НФ}$=14м/с и n=2 имеем R^2=0,961. Именно с этой точки функция (9) принимает форму параболы. При меньших величинах начальной фиксированной скорости показатель степени в (8) и (9) больше двух, а при больших значениях, наоборот, меньше двух.

На рис. 2 на примере песчаной почвы, обработанной кондиционером, показаны графики функции (9) в относительных координатах:

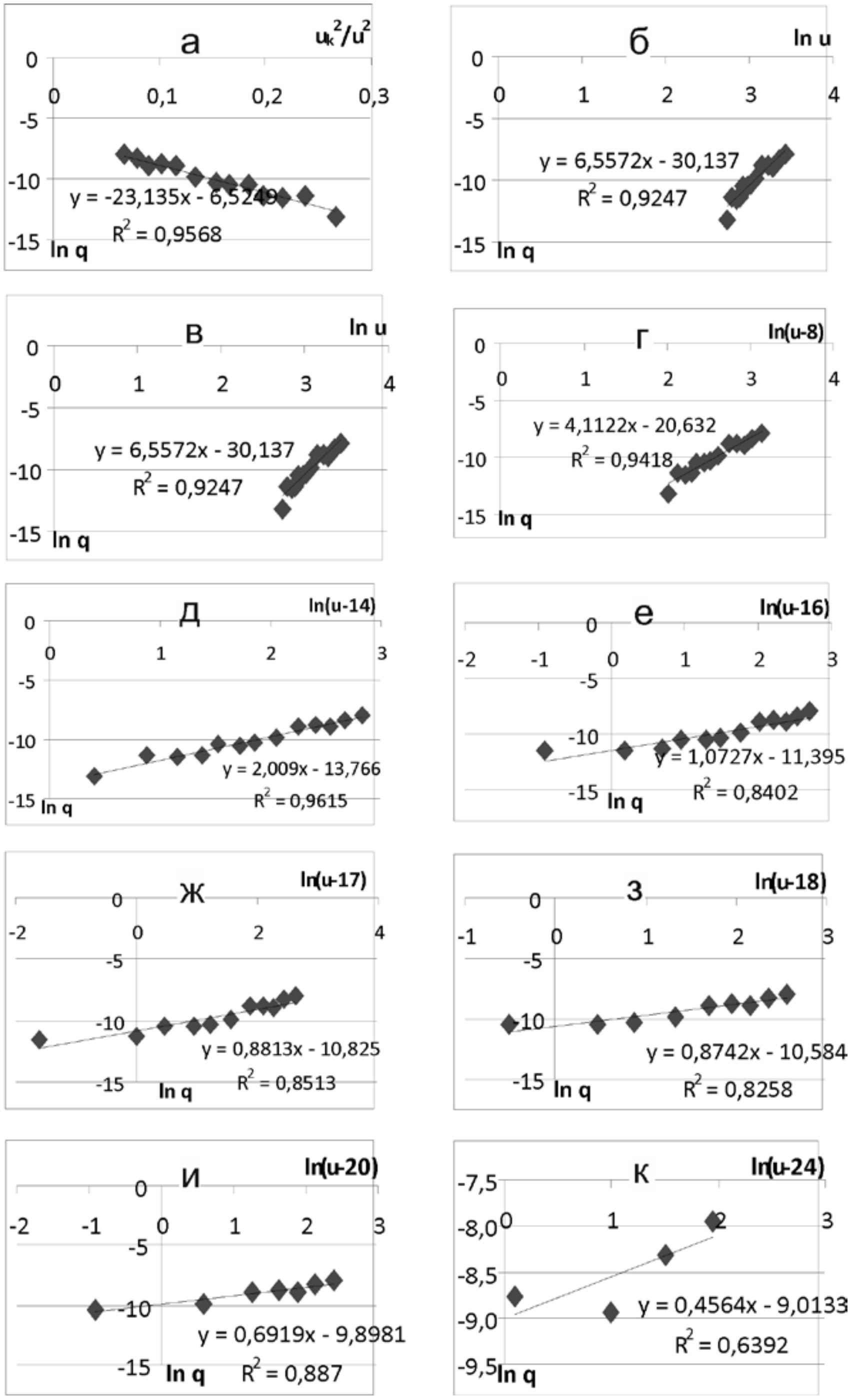

Рис.1. Иллюстрация зависимости показателя степени от начальной фиксированной скорости воздушного потока для песчаной почвы, обработанной кондиционером, в моделях дефляции: а – по В.М. Гендугову и Г.П. Глазунову; б...к – по модели (8), (9) при б – $u_{нф}$=0 м/с; в – $u_{нф}$=4 м/с; г – $u_{нф}$=8 м/с; д – $u_{нф}$=14 м/с; е – $u_{нф}$=16 м/с; ж – $u_{нф}$=17 м/с; з – $u_{нф}$=18 м/с; и – $u_{нф}$=20 м/с; к – $u_{нф}$=24 м/с.

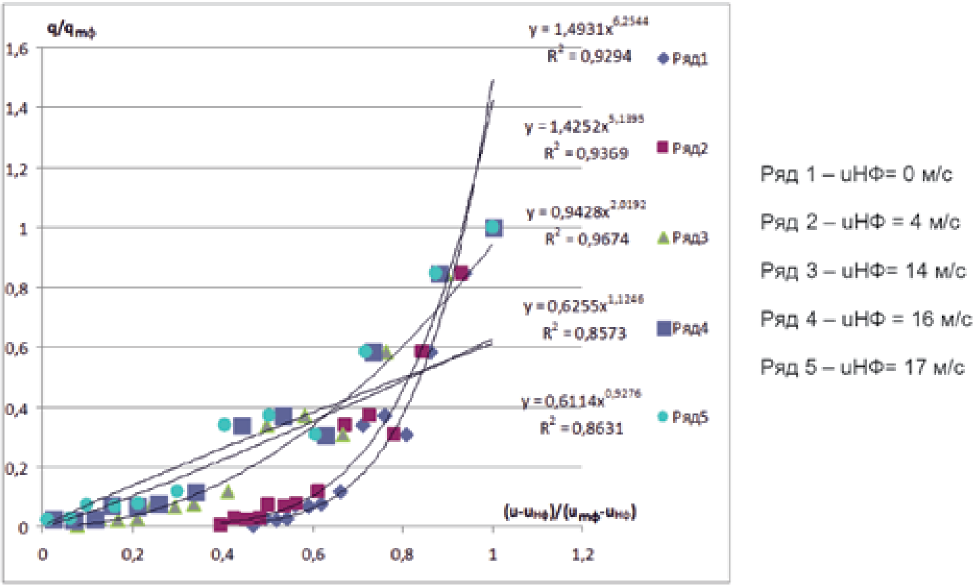

Рис. 2. Зависимость показателя степени в уравнении (9) от начальной фиксированной скорости воздушного потока (в качестве максимальной фиксированной скорости воздушного потока принято значение разрушающей скорости для данного почвенного образца $u_{mФ}$=33 м/с [1])

$$\frac{q}{q_Ф} = \left(\frac{u - u_{НФ}}{u_Ф - u_{НФ}} \right)^n . \tag{14}$$

Совместный анализ линейной (13) и степенной (14) зависимостей представлен в таблице 2. Как видим, полученные по формулам (13) и (14) значения показателей степени между собой практически совпадают (отклонения колеблются в пределах ± 5 %). Причем наилучшие показатели тесноты связи функций (13) и (14) с опытными точками наблюдаем именно при $u_{НФ}$=14м/с и n=2. Показатель степени, равный двум, означает, что функция (14), начиная с точки $u_{НФ}$ принимает форму параболы.

Таким образом, согласно результатам анализа, который подтвердил справедливость (9), в качестве начальной фиксированной скорости используем скорость ветра при n = 2. Скорость воздушного потока, при которой показатель степени n = 2, назовем «начальной квадратичной» скоростью. В качестве второй фиксированной скорости ветра используем критическую скорость ($u_Ф$=$u_{КР}$). В результате получим расчетную зависимость:

$$q = q_{КР} \left(\frac{u - u_Н}{u_{КР} - u_Н} \right)^2 , \tag{15}$$

где $u_Н$ – начальная квадратичная скорость ветра, с которой дефляция начинает развиваться по квадратичному (параболическому) закону; $q_{КР}$ – интенсивность выдувания почвы, зафиксированная при критической скорости воздушного потока; u_{KP} – критическая скорость ветра в «степенной» модели дефляции.

Формула (15) имеет характеристику тесноты связи не хуже, чем у формулы В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (сравним коэффициенты детерминации, приведенные на рис. 1*а,* 1*д* и рис. 2). Вместе с тем, в отличие от модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (1) математическое описание процесса выдувания в виде параболической функции (15) не содержит эмпирических коэффициентов с неясной физической природой. Все составные параметры уравнения (15) имеют ясный физический смысл.

Выполненный выше анализ основан на экспериментальных данных, приведенных в монографии В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1, с. 205, рис. 11.3.2] и представляющих процесс ветровой эрозии песчаной почвы, обработанной кондиционером. Полученные выводы можно подтвердить аналогичным анализом процесса дефляции с использованием других почвенных образцов. Однако следует учитывать, что расчетная формула (15) несколько ограничивает «степенную» модель дефляции, аппроксимируя опытные точки только в области:

$$u_{\text{КР}} \le u. \qquad (16)$$

Заметим, что «экспоненциальная» модель (1) В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова также ориентирована на область (16). Однако возможности «степенной» модели дефляции, предложенной нами, не ограничиваются формулой (15). Более полно раскрыть потенциал модели (8), (9) позволит дальнейший анализ.

Таблица 2

Показатели степени, полученные при разных величинах начальной фиксированной скорости воздушного потока, который воздействует на песчаную почву, обработанную кондиционером, для «степенной» модели дефляции

Начальная фиксированная скорость воздушного потока $u_{Н\Phi}$, м/с	Показатели уравнения (13) по рис. 1			Показатели уравнения (9) по рис. 2		$\frac{n\,(13)}{n\,(9)}$
	N	*n*	R^2	*n*	R^2	
0	–30,137	6,557	0,92	6,254	0,93	1,048
4	–25,300	5,351	0,93	5,140	0,94	1,041
8	–20,632	4,112	0,94	–	–	–
14	–13,766	2,009	0,96	2,019	0,97	0,995
16	–11,395	1,073	0,84	1,125	0,86	0,954
17	—10,825	0,881	0,85	0,928	0,86	0,949
18	–10,584	0,874	0,83	–	–	–
20	–9,898	0,692	0,89	–	–	–
24	–9,013	0,456	0,64	–	–	–

В соответствии с полученными результатами, «начальная квадратичная» скорость ветра (U_H), с которой дефляция начинает развиваться по параболе (n=2), имеет важнейшее значение при практической реализации «степенной» модели дефляции. С другой стороны, она же является дополнительным показателем, который отсутствует в модели (1). Однако заметим, что у В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова для расчета по (6) и (7) требуется определить от четырех до шести исходных показателей, а в формуле (15) их всего три, включая введенную нами в расчет начальную квадратичную скорость ветра. Причем, как показал выполненный выше анализ (сравнение коэффициентов детерминации), результаты расчета по (15) по точности не уступают результатам, полученным по (6).

ВЫВОДЫ

1. Анализ опытных данных по дефляции почвы, приведенных в монографии В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1], показал, что их с достаточно высокой точностью можно аппроксимировать с помощью степенной функции, представленной нами в качестве «степенной» модели дефляции, в которой вместо эмпирических коэффициентов используются фиксированные скорости воздушного потока.

2. Зависимость интенсивности выдувания почвы от скорости ветра принимает форму параболы, начиная с некоторой начальной фиксированной скорости воздушного потока, названной нами «начальной квадратичной» скоростью.

3. Статистические характеристики результатов вычислений, выполненных по установленной параболической зависимости (15), не уступают аналогичным характеристикам, полученным при использовании расчетных формул В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, базирующихся на большем числе исходных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гендугов, В.М. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха / В.М. Гендугов, Г.П. Глазунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 240 с.

2. Лихацевич, Н.А. О пороговой скорости ветра при количественной оценке интенсивности дефляции / Н.А. Лихацевич // Почвоведение и агрохимия. – 2012. – № 1(48). – С. 38–44.

THE UPGRADING OF THE QUANTITATIVE ASSESSMENT METHODS OF WIND EROSION INTENSITY

A.F. Chernysh, N.A. Lihatsevich

Summary

Necessity of maximum simplification of wind erosion process mathematical formulation on account of principled difficulties in practical use for conditions of Belarus of latest soil wind erosion empirical model, developed by V.M. Gendugov and G.P. Glazunov, is substantiate. Supposition, that blowing intensity relate to air stream velocity not by exponential, but by power dependence, is put forward. “Power” wind erosion model encompassing the whole area of possible wind velocities, in which empirical coefficients are absent, is developed on this basis.

Derived model verification using experimental data of V.M. Gendugov and G.P. Glazunov is fulfilled. Is defined, that the most intimate relation with experimental points is observed near the wind velocity 14 m/c and exponent equal 2, i.e. when the function shapes parabola. The parameter – “initial quadratic” air stream velocity, starting with which wind erosion develops according to parabolic law, thus for the first time is determined.

Поступила 1 ноября 2012 г.