УДК 631.459.23

ВЕРИФИКАЦИЯ СТЕПЕННОЙ МОДЕЛИ ДЕФЛЯЦИИ ПОЧВ

Н.А. Лихацевич

Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Анализ опубликованных В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым экспериментальных данных, полученных при исследовании процесса дефляции в аэродинамической трубе [1], позволил нам предложить «степенную» модель выдувания почвы, в которой интенсивность дефляции связана со скоростью воздушного потока степенной зависимостью вида

$$q = q_{\Phi}\left(\frac{U - U_{H\Phi}}{U_{\Phi} - U_{H\Phi}}\right)^{n}, \tag{1}$$

где q_{ϕ} – фиксированная интенсивность выдувания, соответствующая некоторой фиксированной скорости U_{Φ}; n – эмпирический показатель степени, зависящий от величины начальной фиксированной скорости воздушного потока, т.е. $n = f\left(U_{H\Phi}\right)$; $U_{H\Phi}$ – начальная фиксированная скорость воздушного потока.

При этом предполагается, что модель (1) справедлива во всей области возникновения и развития дефляции

$$U_0 < U_{H\Phi} < U_{\Phi} < U_{m\Phi}. \tag{2}$$

где U_0 – пороговая скорость ветра, с которой начинает проявляться касательное напряжение трения, вызванное воздушным потоком на поверхности почвы (для любых почвенных поверхностей, свободных от растительности, 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, при которой происходит полное разрушение целостности почвенной поверхности (например, для образца песчаной почвы, обработанной кондиционером, срыв защитного покрытия и разрушение почвы произошли по данным В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова при $U_{m\Phi}$=33 м/с [1]). В качестве фиксированной скорости воздушного потока (U_{Φ}), следуя рекомендации В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, можно использовать так называемую «критическую» скорость ветра (U_{KP}).

Принимая во внимание вывод В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, что зависимость интенсивности выдувания почвы от скорости воздушного потока во всех случаях имеет вид параболических кривых, в математическое описание процесса выдувания почвы воздушным потоком введена так называемая «начальная квадратичная» скорость ветра, именно с которой дефляция начинает развиваться по параболе (n=2). С использованием данного показателя получена расчетная зависимость, характеризуемая коэффициентом детерминации не меньшим, чем у формул В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1]. Данная зависимость является следствием (1) и имеет вид:

$$q = q_{KP}\left(\frac{U - U_H}{U_{KP} - U_H}\right)^2, \tag{3}$$

где U_H – «начальная квадратичная» скорость ветра, с которой дефляция начинает развиваться по параболическому закону; q_{KP} – интенсивность выдувания почвы, зафиксированная при критической скорости воздушного потока (U_{KP}).

Анализ показал, что расчетная формула (3) аппроксимирует опытные точки в области

$$U > U_{KP}. \tag{4}$$

Зависимость (3) с ограничением (4) является частным случаем «степенной» модели дефляции (1). Сама же модель (1), как выше указано, должна быть справедлива во всей области возможных скоростей воздушного потока (2), вызывающих дефляцию, (от пороговой (U_0) до разрушающей (U_P) скорости). Поэтому интерес представляет обоснование функции, соответствующей модели (1) и аппроксимирующей опытные точки по выдуванию почвы в области до критической скорости, т.е.

$$U_0 < U \le U_{KP}. \tag{5}$$

Искомую функцию можно получить, проанализировав результаты опытов по выдуванию почв, полученные В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым при исследовании процесса дефляции в аэродинамической трубе. В монографии указанных авторов приведен обширный опытный материал, который позволяет изучить закономерности дефляции во всей области ее возможного проявления (2), включая докритические скорости воздушного потока (5) [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первичный анализ выполнен с использованием данных, полученных В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым при испытании обработанного кондиционером образца песчаной почвы на выдувание в аэродинамической трубе [1]. В таблице 1 приведены результаты обработки этих данных на основе «степенной» модели дефляции. Они подтверждают, что показатель степени в (1) является функцией начальной фиксированной скорости.

Таблица 1

Исходные показатели для тестирования функции $n = f(U_{НФ})$, полученные при испытании на выдувание образца песчаной почвы, обработанной кондиционером, по данным [1]

$U_{НФ}$	0	4	8	14	16	17	18	20	24
n	6,56	5,35	4,11	2,01	1,07	0,88	0,87	0,69	0,46

График зависимости $n=f(U_{НФ})$, построенный по данным таблицы 1, наглядно демонстрирует линейность искомой функции с переломом в точке n=1 (рис. 1).

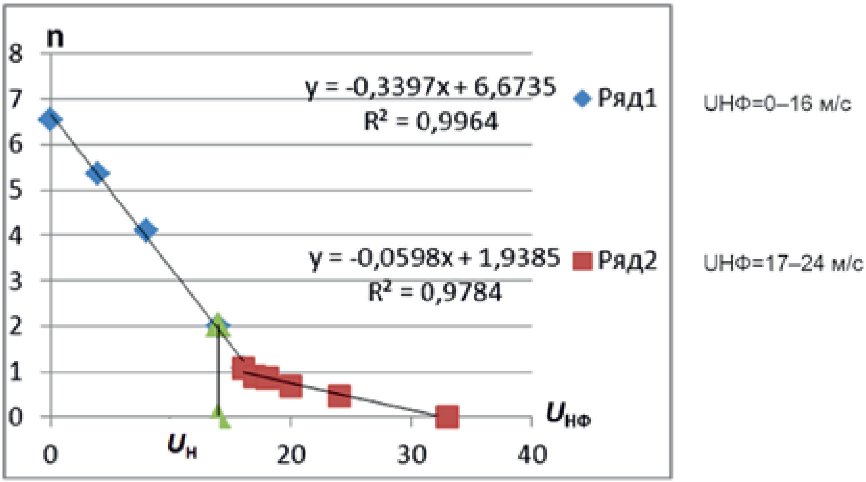


Рис.1. Связь показателя степени (*n*) с величиной начальной фиксированной скорости воздушного потока ($U_{НФ}$).

На рис. 1 показатель степени n=2 соответствует «начальной квадратичной» скорости воздушного потока ($U_{Н}$). Согласно рис. 1, трансформация расчетного выражения (1) в области $0<U\leq U_{КР}$ связана с уменьшением показателя степени n от некоторого максимального значения N_0 до n=1 (рис.1). Причем до и после перелома в точке n=1 функция $n=f(U_{НФ})$ имеет линейную форму, подтверждаемую очень высокими коэффициентами детерминации, превышающими 0,97.

Подобный перелом многократно демонстрируется и в монографии В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1] на графиках функции $\ln B=f(U_К/U)^2$ для различных почвенных поверхностей при достижении воздушным потоком так называемой «критической» скорости. Авторы, анализируя результаты опытов и значения «критической» скорости ветра, дают следующую трактовку данного термина [1, с. 47]: «под критической понимается наименьшая средняя скорость воздушного потока, при которой начинается непрекращающийся отрыв и вынос почвенных частиц, закономерно возрастающий с ростом скорости ветра». Дополним трактовку В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова и назовем «критической» скорость воздушного потока на графике функции $n=f(U_{НФ})$ в точке с n=1.

Полученный вывод основан на результатах испытаний одного почвенного образца (рис. 1). Необходимо подтвердить линейность функции $n=f(U_{НФ})$ в области $n\geq1$ для других почвенных образцов.

Используем для этого данные по связи безразмерного комплексного показателя дефляции (B) с квадратом относительной скорости воздушного потока $(U_К/U)^2$, представленной В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым в виде эмпирического уравнения [1]

$$\ln B_{ГГ} = \beta - \alpha\frac{U_K^2}{U^2}, \tag{6}$$

где ln – знак натурального логарифма; $B_{ГГ}$ – комплексный показатель массообмена, введенный в расчет В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым, (безразмерный комплекс, обобщенно характеризующий основные показатели дефляции), который равен [1]

$$B = q\frac{U}{\tau}, \qquad (7)$$

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 скорость воздушного потока (м/с); α и β – эмпирические коэффициенты, отражающие влияние свойств почвы и воздушного потока на показатели эрозии (безразмерные величины).

Значение аналогичного комплексного показателя ($B_{ГГ}$) можно также получить путем логарифмирования выражения (1)

$$\ln B_{ГГ} = \ln\frac{q_{тф}}{a\rho_в(U_{тф} - U_{нф})^n} - \ln U + n\ln(U - U_{нф}),$$

Запишем полученное уравнение в удобном для анализа виде:

$$\ln B_{ГГ} + \ln U = \ln\frac{q_{тф}}{a\rho_в(U_{тф} - U_{нф})^n} + n\ln(U - U_{нф}). \qquad (8)$$

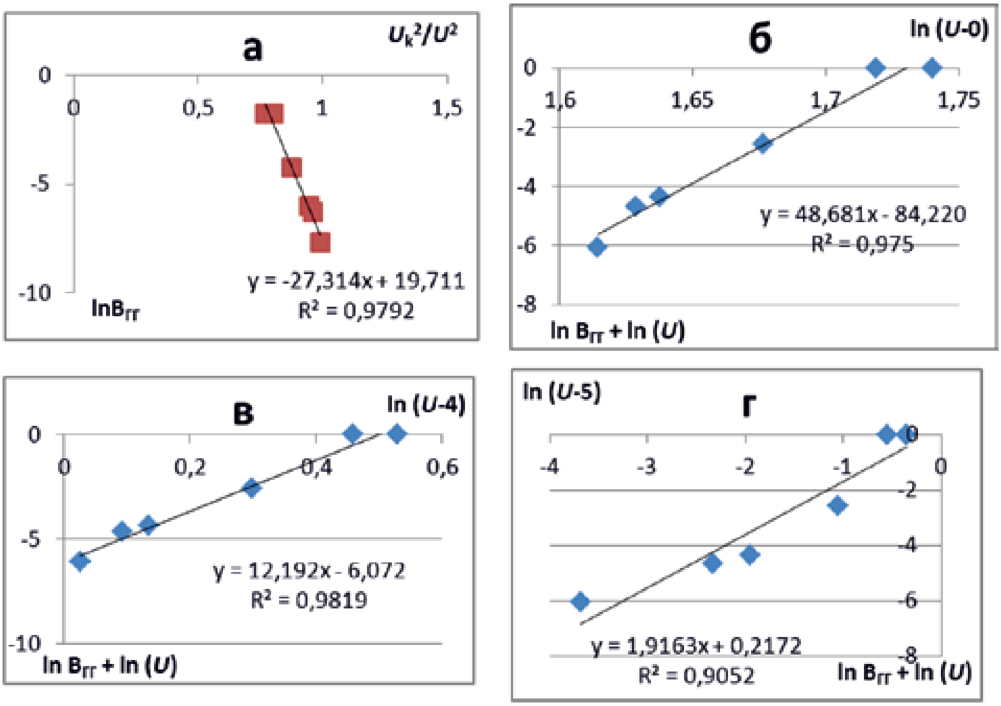
Функцию (8) используем для тестирования модели (1) по данным, представленным в монографии В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1, с. 68, табл. 4.1.1, с. 69, рис. 4.1.1]. В качестве примера, поясняющего методику тестирования, приводим таблицу 2 и ее иллюстрацию на рис. 2.

Таблица 2

Расчет показателей для тестирования модели дефляции (1) по уравнению (8) и данным [1] для песчаных почв с частицами, размером 0,1…0,25 мм

$\ln B_{ГГ}$	$U_К^2/U^2$	$U^2(U_К$=5м/с)	U, м/с	ln(U)	ln$B_{ГГ}$+ln(U)	U–4	ln(U–4)	U–5	ln(U–5)
–1,75	0,770	32,648	5,698	1,7401	–0,00987	1,698	0,5295	0,698	–0,35949
–1,72	0,803	31,133	5,580	1,7191	–0,00086	1,580	0,4572	0,580	–0,54521
–4,26	0,874	28,604	5,348	1,6768	–2,58322	1,348	0,2988	0,348	–1,05474
–6,00	0,945	26,445	5,143	1,6377	–4,36227	1,143	0,1340	0,143	–1,94180
–6,30	0,962	25,988	5,098	1,6288	–4,67119	1,098	0,0933	0,098	–2,32487
–7,67	0,990	25,253	5,025	1,6145	–6,05553	1,025	0,0249	0,025	–3,68134
–9,25	1,080	23,148	4,811	1,5709	–7,67909	0,811	–0,2095	–0,189	–
–10,95	1,160	21,552	4,642	1,5351	–9,41485	0,642	–0,4432	–0,358	–
–10,95	1,293	19,335	4,397	1,4809	–9,46907	0,397	–0,9238	–0,603	–
–9,55	1,324	18,882	4,345	1,4690	–8,08097	0,345	–1,0642	–0,655	–

Графики функции (8), приведенные на рис. 2, подтверждают линейность функции $n=f(U_{НФ})$ в области $N_0(U_{НФ}=0) \leq n \leq 1$ для анализируемого почвенного образца с высокой степенью достоверности (коэффициент детерминации близок к 1) при изменении начальной фиксированной скорости от нулевого значения до критической скорости. Причем в расчетах значения начальной фиксированной скорости последовательно выбраны равными нулю ($U_{НФ}$=0), пороговой скорости ($U_{НФ}=U_0$=4м/с) и критической для данной почвы скорости ($U_{НФ}=U_{КР}$=5м/с). Можно добавлять произвольные значения начальной фиксированной скорости в диапазоне $0 \le U_{Н\Phi} \le U_{КР}$. Но с целью сокращения количества возможных вариантов расчетов до обоснованного минимума ограничимся тремя указанными точками, расположение которых на плоскости позволяет уверенно подтвердить линейность функции $n=f(U_{Н\Phi})$.



$U_{нф}$	n
0	48,680
4	12,192
5	1,916

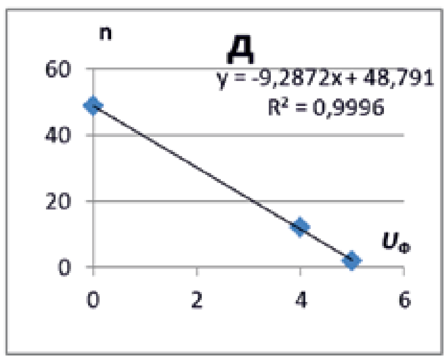


Рис. 2. Графики тестирования моделей дефляции для песка с размером частиц 0,1–0,25: а – М.В. Гендугова и Г.П. Глазунова; б...д – по функции (8) при: б – $U_{нф}$=0; в – $U_{нф}$=4; г – $U_{нф}$=5 м/с; д – сводная функция $n=f(U_{Н\Phi})$.

Аналогичным образом нами протестированы данные по всему спектру песчаных и черноземных почв, приведенные в [1, с. 68, табл. 4.1.1 и с. 69, рис. 4.1.1]. Заметим, что коэффициент детерминации линейной связи $n=f(U_{Н\Phi})$ в диапазоне $0 \le U_{Н\Phi} \le U_{КР}$ ($U_{КР}$ – критическая скорость воздушного потока для данной почвы, рассчитанная из условия n=1) во всех случаях превышает 0,99, что несомненно является убедительным подтверждением линейности данной связи в области

$n \geq 1$. В таблице 3 приведены результаты общего тестирования, в том числе и начальная квадратичная скорость (U_H), при которой в расчетном уравнении показатель степени n=2.

На основании данных таблицы 3 с очень высокой степенью достоверности можем утверждать, что «степенная» модель дефляции (1), предложенная нами, во-первых, подтверждена опытными данными В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1], во-вторых, имеет характеристики достоверности не хуже, чем у «экспоненциальной» модели дефляции В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, а в-третьих, позволяет до минимума свести набор эмпирических параметров, используемых при расчете. Последнее утверждение требует дополнительных пояснений.

В соответствии с установленной закономерностью (рис. 2), можно предложить расчетную схему, представленную в общем виде на рис. 3.

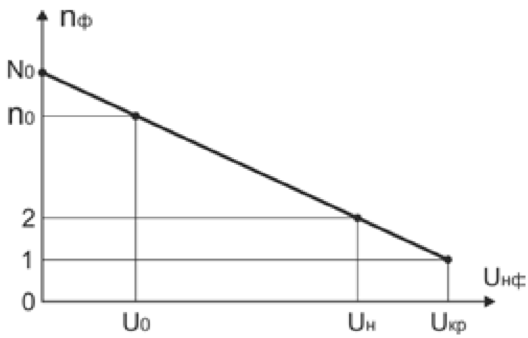


Рис. 3. График зависимости показателя степени (n) в модели дефляции (1) от начальной фиксированной скорости ($U_{НФ}$)

Таким образом, на основании результатов анализа (рис.2, 3) из «степенной» модели дефляции (1) получаем ряд зависимостей, которые можно использовать для расчета дефляции в области $U_0 < U \leq U_{КР}$, а именно:

$$\frac{q}{q_{KP}} = \left(\frac{U}{U_{KP}}\right)^{N_0} = \left(\frac{U - U_0}{U_{KP} - U_0}\right)^{n_0} = \left(\frac{U - U_H}{U_{KP} - U_H}\right)^2, \quad (9)$$

где N_0 – показатель степени в функции (1) при $U_{НФ}$=0; n_0 – показатель степени в функции (1) при $U_{НФ}=U_0$=4м/с

Исходя из линейности функции $n=f(U_{НФ})$, справедлива система пропорций (рис. 3):

$$\frac{N_0 - 1}{U_{KP}} = \frac{N_0 - 2}{U_H} = \frac{N_0 - n_0}{U_0} = \frac{n_0 - 1}{U_{KP} - U_0} = \frac{n_0 - 2}{U_H - U_0} = \frac{2 - 1}{U_{KP} - U_H}. \quad (10)$$

Из данной системы можно получить ряд зависимостей для определения показателей степени N_0 и n_0, соответствующих $U_{НФ}$=0 и $U_{НФ}=U_0$. Но прежде для решения поставленной задачи запишем линейное уравнение, связывающее параметры, входящие в (10). Это уравнение прямой, проходящей через две крайние точки (рис. 3) с координатами (0; N_0) и ($U_{КР}$; 1):

$$\frac{N_0 - n}{N_0 - 1} = \frac{U_{НФ} - 0}{U_{KP} - 0}. \quad (11)$$

Таблица 3

Сравнительный анализ данных, используемых при расчете комплексного показателя $B_{ГГ}$ на основе модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (6) и модели (1)

Почвенные частицы	Размер частиц, мм	Данные (6)	Данные расчета по (8)	Сравнение результатов расчета
		$U_к$	$U_н$	$U_н/U_к$
Песок	0,10–0,25	5,0	5,04	1,008
Песок	0,20–0,30	7,0	7,08	1,011
Песок	0,30–0,40	8,0	8,16	1,020
песок	0,63–0,80	6,2	6,18	0,997
Песок	0,80–1,00	7,9	8,14	1,030
Чернозем	0,00–0,25	5,0	5,32	1,064
Чернозем	0,25–0,50	6,2	6,45	1,040
Чернозем	0,50–1,00	6,0	6,24	1,040
Чернозем	1,00–2,00	6,1	6,18	1,013
Чернозем	2,00–3,00	6,2	6,05	0,976
Чернозем	3,00–5,00	6,4	6,39	0,998

Из (10) следует

$$n = N_0 - (N_0 - 1)\frac{U_{HФ}}{U_{KP}} = N_0\left(1 - \frac{U_{HФ}}{U_{KP}}\right) + \frac{U_{HФ}}{U_{KP}}. \tag{12}$$

Как показали расчеты, в функции $n=f(U_{HФ})$ значение показателя степени (N_0) зависит только от вида поверхности, подвергаемой воздействию воздушного потока, т.е. для любой почвенной поверхности N_0 есть величина постоянная. Из системы пропорций (10) можно получить зависимость показателя степени N_0 от начальной и критической скоростей воздушного потока. Например, из первого равенства системы (10) следует

$$N_0 = \frac{2U_{KP} - U_H}{U_{KP} - U_H} = 1 + \frac{U_{KP}}{U_{KP} - U_H}. \tag{13}$$

С учетом (13) из (12) получим:

$$n_Ф = \frac{2U_{KP} - U_H - U_{HФ}}{U_{KP} - U_H} = 1 + \frac{U_{KP} - U_{HФ}}{U_{KP} - U_H}. \tag{14}$$

Последняя зависимость существенно упрощает расчетную формулу «степенной» модели дефляции, которая сводится к выражению

$$q = q_Ф\left(\frac{U - U_{HФ}}{U_Ф - U_{HФ}}\right)^{1 + \frac{U_{KP} - U_{HФ}}{U_{KP} - U_H}}. \tag{15}$$

Напомним, что при использовании (15) следует руководствоваться ограничениями (2).

Из (14) следует, что если в качестве начальной фиксированной скорости выбрана начальная квадратичная скорость дефляции (U_H), то

$$q = q_{KP}\left(\frac{U - U_H}{U_{KP} - U_H}\right)^2. \tag{16}$$

Если же в качестве начальной фиксированной скорости принять пороговую скорость ветра (U_0), то

$$q = q_{KP}\left(\frac{U - U_0}{U_{KP} - U_0}\right)^{n_0}, \tag{17}$$

где
$$n_0 = 1 + \frac{U_{KP} - U_0}{U_{KP} - U_H} = 2 + \frac{U_H - U_0}{U_{KP} - U_H}. \tag{18}$$

Необходимо заметить, что расчет по (16) требует предварительного определения трех параметров: начальной квадратичной (U_H), критической (U_{KP}) скорости и интенсивности выдувания ($q_{КР}$) при критической скорости воздушного потока. Их определение связано с опытами, т.е. осуществляется эмпирически. Вместе с тем, «экспоненциальную» и «степенную» модели дефляции объединяет один показатель. Статистический анализ показал, что критическая скорость ($U_к$), установленная и использованная в «экспоненциальной» модели дефляции В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым для песков и черноземов с разным размером частиц, для тех же почвенных поверхностей близка к начальной квадратичной скорости (U_H), соответствующей «степенной» модели дефляции (табл. 3, рис. 4). Следовательно, для любых почвенных поверхностей, для которых В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым установлены значения критической скорости ($U_к$), эти же значения можно использовать в расчетах по полученным нами зависимостям, но уже в качестве начальной квадратичной скорости (U_H).

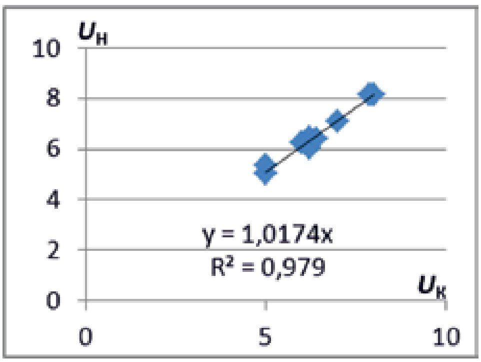


Рис. 4. Графики связи начальной скорости (**$U_н$**) в «степенной» модели дефляции с критической скоростью (**$U_к$**) по модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова (6)

Таким образом, с высокой степенью достоверности (коэффициент детерминации превышает 0,97) можно утверждать, что предложенная нами модель дефляции, во-первых, по точности не уступает модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1], а во-вторых, отличается от последней минимумом эмпирических коэффициентов.

В заключение уточним, какую зависимость следует использовать при расчете интенсивности дефляции в области скоростей $U_0 < U \leq U_{КР}$. Очевидно, что функции (17), (18) позволяют решить эту задачу. На рис. 5 приведен график, поясняющий схему расчета интенсивности выдувания почвы воздушным потоком по формулам «степенной» модели дефляции. В диапазоне скоростей ветра от пороговой (U_0) до критической ($U_{КР}$) для расчета интенсивности дефляции используются зависимости (17), (18) а в диапазоне скоростей ветра от критической ($U_{КР}$) до разрушающей ($U_Р$) для расчета интенсивности дефляции используется зависимость (16).

Таким образом, уравнения (16)–(18) охватывают всю область – от пороговой (U_0) до разрушающей ($U_Р$) скоростей ветра. Тем самым, в отличие от «экспоненциальной» модели дефляции В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, где расчет интенсивности выдувания почвы распространяется только на область $U_{КР} < U \leq U_Р$, предложенная нами «степенная» модель охватывает весь диапазон дефляционно опасных скоростей ветра. В этом состоит ее дополнительное преимущество.

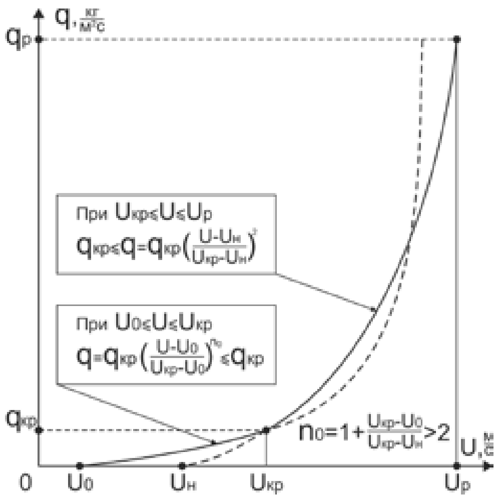


Рис. 5. Схема расчета интенсивности дефляции

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 отсутствуют эмпирические коэффициенты, а используются фиксированные значения скоростей воздушного потока.

2. В основе «степенной» модели дефляции находится три физических параметра, требующие экспериментального определения:

– начальная квадратичная скорость ветра, начиная с которой дефляция развивается по параболическому закону;

– критическая скорость ветра, начиная с которой, в соответствии с определением В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1], происходит отрыв частиц от поверхности почвы и их вынос воздушным потоком, возрастающий при увеличении скорости ветра (начинает развиваться пыльная буря);

– интенсивность выдувания почвы, зафиксированная при критической скорости воздушного потока.

3. Расчет интенсивности дефляции рекомендуется проводить раздельно в докритическом и посткритическом диапазонах скоростей воздушного потока с использованием соответствующих зависимостей:

– в области $U_0<U<U_{КР}$

$$q = q_{КР}\left(\frac{U-U_0}{U_{КР}-U_0}\right)^{n_0}, \; n_0 = 2+\frac{U_Н-U_0}{U_{КР}-U_Н} > 2;$$

– в области $U_{КР}\leq U<U_Р$

$$q = q_{КР}\left(\frac{U-U_Н}{U_{КР}-U_Н}\right)^2.$$

4. Статистические характеристики достоверности результатов расчета различных показателей, характеризующих связь интенсивности выдувания почвы со скоростью ветра, с использованием полученных нами зависимостей не уступают аналогичным характеристикам, полученным В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым при использовании в вычислениях предложенной ими модели.

5. В отличие от «экспоненциальной» модели дефляции В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, ограничивающей расчет интенсивности выдувания почвы скоростями воздушного потока, превышающими критическую, «степенная» модель дефляции охватывает всю область дефляционно опасных скоростей ветра.

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 VERIFICATION OF POWER SOILS WIND EROSION MODEL

N.A. Lihatsevich

Summary

The results of experimental information analysis of soil blowing, published in monograph by V.M. Gendugov and G.P. Glazunov (2007), are presented in article. Calculations are realized with using introduced wind erosion “power” model. Three parameters, which possess clear physical interpretation – “threshold”, “initial quadratic” and “critical” air stream velocities, underlie in the introduced by us model instead of nondescript and unconnected empiric coefficients are ingressed in wind erosion “null-model” of V.M. Gendugov and G.P. Glazunov It is shown, that “power” model covers all area of wind erosion hazard velocities. Two dependences are proposed for wind erosion intensity calculation, one of which works in the range of wind velocities from threshold up to critical, other – in the range of wind velocities exceeded critical.

Поступила 1 ноября 2012 г.