УДК 631.459.23

# КОМПЛЕКСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ВЫДУВАНИЯ ПОЧВЫ

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

## ВВЕДЕНИЕ

При обобщении материалов экспериментальных исследований выдувания почвы, проведенных в аэродинамической трубе, В.М. Гендугов и Г.П. Глазунов предложили опытные данные обрабатывать с использованием комплексных характеристик, установленных с помощью теории подобия и анализа размерностей физических величин [1]. Данные характеристики авторы положили в основу так называемой «нуль-модели выдувания почвы», представленной в виде экспоненциальной зависимости интенсивности дефляции от скорости ветра. Поэтому разработанную В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым модель выдувания почвы мы называем «экспоненциальной» моделью дефляции.

В своем исследовании закономерностей дефляции для обобщения того же опытного материала [1] мы использовали не экспоненциальную, а степенную зависимость и построили на этой основе «степенную» модель выдувания почвы. Эффективность предложенной модели в расчетах дефляции (по сравнению с «экспоненциальной» моделью В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова) была подтверждена близкими результатами статистического анализа опытных данных и меньшим числом параметров, присутствующих в полученных нами расчетных зависимостях. Причем в «степенной» модели мы использовали не эмпирические коэффициенты, а опорные значения скорости воздушного потока, определяющие качественные границы в развитии процесса дефляции. Например, для расчета интенсивности выдувания почвы получены формулы:

– в области $U_0 \leq U < U_{KP}$

$$q = q_{KP}\left(\frac{U-U_0}{U_{KP}-U_0}\right)^{n_0}, \tag{1}$$

где $q$ – интенсивность выдувания почвы, кг/м$^2$с; $q_{KP}$ – интенсивность выдувания при критической скорости воздушного потока, кг/м$^2$с; $U$ – фактическая скорость воздушного потока, м/с; $U_0$ – пороговая скорость воздушного потока, при которой на поверхности почвы начинает действовать вызванное ветром касательное напряжение трения, являющееся причиной дефляции, ($U_0$=4м/с [2]); $U_{KP}$ – критическая скорость ветра, начиная с которой происходит непрекращающийся отрыв и вынос частиц с поверхности почвы воздушным потоком, увеличивающийся с ростом скорости ветра, м/с; $n_0$ – показатель степени,

$$n_0 = 2 + \frac{U_H - U_0}{U_{KP} - U_H}, \tag{2}$$

– в области $U_{KP} \leq U < U_P$

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

где $U_H$ – начальная «квадратичная» скорость воздушного потока, с которой интенсивность дефляции развивается по параболическому закону, м/с [2]; $U_P$ – разрушающая скорость воздушного потока, при которой разрушается и поднимается в воздух вся почвенная поверхность [1].

Заметим, что расчетные уравнения (1), (2) и (3) охватывают весь диапазон возможных скоростей ветра, в то время как «экспоненциальная» модель В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1] ограничена областью $U_{KP} \leq U$.

Для расчета интенсивности дефляции по формулам (1) и (2) необходимо знать три параметра, которые устанавливаются для каждого вида почвенной поверхности: $q_{KP}$, $U_{KP}$, $U_H$. Четвертый параметр – пороговая скорость для всех почвенных поверхностей постоянна и равна $U_0$ = 4 м/с [2]. В свою очередь, расчетные формулы, полученные В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым на основе «экспоненциальной» модели дефляции, имея те же статистические характеристики достоверности, что и формулы (1) и (2), используют большее число исходных параметров [1].

Однако преимущества установленных форм связи (1) и (3) не распространяются на решение проблемы полной количественной оценки процесса дефляции. Эти формулы определяют только интенсивность выдувания при заданной скорости ветра и не позволяют напрямую сравнивать между собой способности конкретных почв противостоять разрушающему действию ветра. Следует дополнить полученные формулы (1) и (3) показателями, комплексно характеризующими воздействие ветра и противодефляционную устойчивость почв.

Для решения данной задачи используем, как и в [1], теорию размерностей и подобия физических величин.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫДУВАНИЯ ПОЧВЫ

Обратимся к общему подходу, при котором для упрощения анализа предварительно сформулируем в общем виде связь между факторами, характеризующими выдувание почвы. Воспользуемся для этого функцией, предложенной В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым [1]:

$$f(E, q, \tau, U - U_0, U_{KP} - U_0) = 0, \tag{4}$$

где $E$ – плотность энергии, необходимой для выдувания почвы, Дж/кг(м²/с²); $\tau$ – касательное напряжение трения, вызываемое ветром на поверхности почвы, Н/м² (кг/мс²).

Отличие (4) от оригинала [1] состоит только в использовании дефляционных составляющих скоростей воздушного потока ($U - U_0$) и ($U_{KP} - U_0$) вместо абсолютных значений скоростей ($U$) и ($U_{KP}$).

В соответствии с теорией размерностей и подобия физических величин [3], если уравнение включает «*n*» размерных физических параметров, размерность которых определяется через «*m*» основных физических величин, то это уравнение может быть преобразовано в зависимость между «*n*–*m*» независимыми безразмерными соотношениями, составленными из «*m*+1» входящих в него показателей.

В (4) входит пять размерных физических параметров ($E$, $q$, $\tau$, $U–U_0$, $U_{КР}–U_0$), т.е. $n$=5. Размерности этих параметров содержат основные физические величины – *кг*, *м*, *с*, т.е. $m$=3. Следовательно, расчетные уравнения могут быть преобразованы в два независимых безразмерных соотношения ($n$–$m$=5–3=2), составленных из четырех параметров ($m$+1=3+1=4), входящих в (4). Исходя из обобщенной функции (4), искомые соотношения составят систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = E^{x_1} q^{x_2} \tau^{x_3} \left(U - U_0\right) \\ y_2 = q^{z_1} \tau^{z_2} (U_{КР} - U)^{z_3} \left(U - U_0\right) \end{cases}. \tag{5}$$

Поясним, что показатель степени у последнего множителя в системе уравнений (5) принят равным единице с целью минимизации выполняемых алгебраических действий.

Вместо обозначений физических параметров в (5) подставим их размерности. В результате получим:

$$\begin{cases} y_1 = \left(\dfrac{м^2}{с^2}\right)^{x_1} \left(\dfrac{кг}{м^2 с}\right)^{x_2} \left(\dfrac{кг}{мс^2}\right)^{x_3} \left(\dfrac{м}{с}\right) \\ y_2 = \left(\dfrac{кг}{м^2 с}\right)^{z_1} \left(\dfrac{кг}{мс^2}\right)^{z_2} \left(\dfrac{м}{с}\right)^{z_3} \left(\dfrac{м}{с}\right) \end{cases}. \tag{6}$$

Систему уравнений (6) перепишем в более удобном для решения развернутом виде:

$$\begin{cases} y_1 = м^{2x_1} с^{-2x_1} кг^{x_2} м^{-2x_2} с^{-x_2} кг^{x_3} м^{-x_3} с^{-2x_3} мс^{-1} \\ y_2 = кг^{z_1} м^{-2z_1} с^{-z_1} кг^{z_2} м^{-z_2} с^{-2z_2} м^{z_3} с^{-z_3} мс^{-1} \end{cases}. \tag{7}$$

Приведем подобные члены (7) в соответствие с законами алгебраического умножения:

$$\begin{cases} y_1 = м^{2x_1 - 2x_2 - x_3 + 1} с^{-2x_1 - x_2 - 2x_3 - 1} кг^{x_2 + x_3} \\ y_2 = кг^{z_1 + z_2} м^{-2z_1 - z_2 + z_3 + 1} с^{-z_1 - 2z_2 - z_3 - 1} \end{cases}. \tag{8}$$

Поскольку нами поставлена задача получить из (5)…(8) безразмерные соотношения (с нулевой размерностью), приравняем нулю показатели степени при физических величинах (*кг*, *м*, *с*). Соответственно, из (8) получим две системы уравнений:

$$\begin{cases} 2x_1 - 2x_2 - x_3 + 1 = 0 \\ -2x_1 - x_2 - 2x_3 - 1 = 0; \\ x_2 + x_3 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = 0 \\ -2z_1 - z_2 + z_3 + 1 = 0. \\ -z_1 - 2z_2 - z_3 - 1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Решением системы уравнений (9) будут значения:

$$x_1 = 0,\ x_2 = 1,\ x_3 = -1. \quad (11)$$

Полученные значения показателей степени (11) подставим в первое уравнение системы (5). Следовательно,

$$y_1 = \frac{q\left(U - U_0\right)}{\tau}. \quad (12)$$

В свою очередь, решение системы уравнений (10) возможно в двух вариантах:

$$z_1 = 0;\ z_2 = 0;\ z_3 = -1\ , \quad (13)$$

$$z'_1 = 1;\ z'_2 = -1;\ z'_3 = 0. \quad (14)$$

В первом варианте (13) от второго уравнения системы (5) приходим к безразмерному соотношению:

$$y_2 = \frac{U - U_0}{U_{KP} - U_0}. \quad (15)$$

Во втором варианте (14) из (5) получим результат аналогичный (12), т.е.

$$y_2^I = \frac{q\left(U - U_0\right)}{\tau}. \quad (16)$$

Учитывая полученную форму представления комплексных характеристик процесса дефляции (12), (15) и (16), предложим следующие их названия:

$$B = \frac{q\left(U - U_0\right)}{\tau} = y_1 = y_2^I; \quad (17)$$

$$D = \frac{U - U_0}{U_{KP} - U_0} = y_2, \quad (18)$$

где $B$ – показатель дефлируемости почвы; $D$ – дефляционный потенциал ветра.

В «экспоненциальной» модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова основные характеристики дефляции также организованы в виде двух безразмерных параметров [1]:

$$B_{ГГ} = \frac{q_{ГГ}\ U}{\tau_{ГГ}} = \frac{q_{ГГ}}{a\ \ \rho_B\ \ U}; \quad (19)$$

$$A_{ГГ} = \left(\frac{U_{KP}}{U}\right)^2, \quad (20)$$

где $B_{гг}$ – показатель дефлируемости почвы (безразмерная величина) в «экспоненциальной» модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова; $q_{гг}$ – интенсивность выдувания почвы (кг/м$^2$с) в «экспоненциальной» модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова;

$\tau_{ГГ}$ – касательное напряжение трения, вызываемое ветром на поверхности почвы (Н/м$^2$ = кг/мс$^2$) в «экспоненциальной» модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова; $\alpha$ – безразмерный эмпирический коэффициент в уравнении связи касательного напряжения трения, вызванного на поверхности почвы воздушным потоком; $p_B$ – плотность воздуха (кг/м$^3$); $A_{ГГ}$ – относительный показатель, характеризующий ветровую нагрузку на почвенную поверхность.

В «степенной» модели дефляции зависимость касательного напряжения трения на поверхности почвы от скорости ветра аппроксимируется функцией [2]

$$\tau = a_0 \rho_B (U - U_0)^2, \tag{21}$$

где $\tau$ – касательное напряжение трения, вызванное ветром на поверхности почвы при скорости $U>U_0$; $\alpha_0$ – эмпирический коэффициент, подобный коэффициенту «$\alpha$» в модели В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова.

С учетом (21) комплексный показатель (17) будет равен:

$$B = \frac{q(U - U_0)}{\tau} = \frac{q}{a_0 \rho_В (U - U_0)}. \tag{22}$$

Таким образом, используя теорию размерностей и подобия физических величин, мы получили два безразмерных комплексных соотношения (18) и (22), характеризующие процесс выдувания почвы, представленный функцией (4). Отметим, что у В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [1] получены принципиально похожие комплексные безразмерные характеристики (19), (20). Первая комплексная характеристика (17), (22) отличается от аналогичной, предложенной В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым (19) учетом дефляционной составляющей скорости воздушного потока ($U–U_0$), а не ее абсолютного значения ($U$). Вторая характеристика (18), помимо указанного, отличается отсутствием второй степени, в которую авторы [1] возвели отношение критической скорости к фактической. Последнее отличие не принципиально, поскольку из теории размерностей и подобия физических величин известно, что любые алгебраические операции с полученными безразмерными соотношениями (например, умножение или деление на натуральные числа, или возведение в степень) не изменяют физической сущности полученных комплексных безразмерных показателей. Ранее нами было показано, что данная корректировка и использование в расчетах не абсолютных скоростей ветра ($U$), ($U_{КР}$), а их дефляционных составляющих ($U–U_0$), ($U_{КР}–U_0$) повышает достоверность конечного результата [2].

Для вычисления дефляционного потенциала ветра помимо фактической ($U$) и пороговой ($U_0$) скоростей необходимо знать критическую ($U_{КР}$) скорость, определение которой связано с проведением соответствующих опытов. По результатам этих же опытов устанавливается интенсивность дефляции при критической скорости ($q_{КР}$).

Значение показателя дефлируемости почвы ($B$) также зависит от названных характеристик, фактической интенсивности выдувания ($q$) и эмпирического коэффициента ($\alpha_0$). Упростим расчет этого показателя, для чего используем отношение

$$b = \frac{B}{B_{КР}}, \tag{23}$$

где $b$ – относительный показатель дефлируемости почвы.

Подставив в (23) выражения (1) и (3) получим:

– в области $U_0 \leq U < U_{KP}$

$$b_1 = \frac{q}{q_{KP}}\left(\frac{U_{KP}-U_0}{U-U_0}\right) = \left(\frac{U-U_0}{U_{KP}-U_0}\right)^{n_0-1}, \tag{24}$$

– в области $U_{KP} \leq U < U_P$

$$b_2 = \frac{q}{q_{KP}}\left(\frac{U_{KP}-U_0}{U-U_0}\right) = \left(\frac{U-U_H}{U_{KP}-U_H}\right)^2\left(\frac{U_{KP}-U_0}{U-U_0}\right), \tag{25}$$

где $b_1$, $b_2$ – относительные показатели дефлируемости почвы.

Анализ показал, что для оценки воздействия ветра на разные почвенные поверхности можно предложить следующее ранжирование дефляционных потенциалов ветра (ДПВ), которое справедливо для любых почвенных поверхностей:

$D < 1$ – слабый ДПВ;

$1 \leq D < 1{,}5$ – умеренный (средний) ДПВ;

$1{,}5 \leq D < 2$ – высокий ДПВ;

$2 \leq D < 3$ – очень высокий ДПВ;

$3 \leq D$ – разрушающий ДПВ.

На рис. приведены графики, показывающие области ветровой нагрузки, соответствующие указанным градациям дефляционного потенциала ветра. Как видим, в соответствии с зависимостью (18), чем выше критическая скорость ветра для почвенной поверхности, тем больше диапазон возможных скоростей, составляющих заданную градацию дефляционного потенциала ветра.

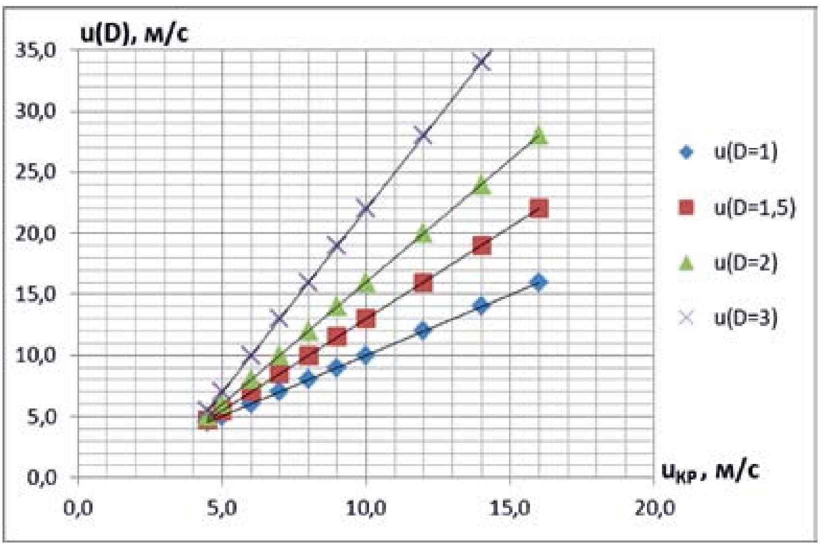


Рис. Градации дефляционных потенциалов ветра

В свою очередь, введение относительных показателей дефлируемости почвы (24), (25) позволяет упростить расчет данных характеристик процесса дефляции, используя для этого только фиксированные скорости ветра. Причем важно, что интенсивность дефляции при любой скорости ветра можно найти, используя полученные выше комплексные характеристики процесса дефляции, а именно

$$q = q_{KP} bD. \tag{26}$$

Таким образом, определив относительный показатель дефлируемости почвы (24) или (25), а также дефляционный потенциал ветра (18), можно оценивать воздействие ветра и противодефляционную устойчивость любой почвенной поверхности, начиная от рыхло сложенных пылеватых частиц и завершая твердыми (сцементированными) поверхностями.

## ВЫВОДЫ

1. Применение теории размерностей и подобия физических величин к параметрам, представляющим процесс выдувания почвы, позволило получить комплексные характеристики процесса дефляции в безразмерной форме:
   – дефляционный потенциал ветра;
   – показатель дефлируемости почвенной поверхности.
2. С использованием полученных комплексных характеристик можно количественно оценивать и сравнивать между собой противодефляционную устойчивость любых почвенных поверхностей и степень воздействия на них воздушного потока.

## 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.

3. Сена, Л.А. Единицы физических величин и их размерности / Л.А. Сена. – М.: Наука, 1988. – 432 с.

## COMPLEX CHARACTERISTICS OF SOIL BLOWING PROCESS

**N.A. Lihatsevich, A.F. Chernysh**

**Summary**

Theory of magnitudes dimension and similarity application to parameters representing soil blowing process allowed to receive two complex characteristics of wind erosion process in dimensionless form – erosion wind potential and comparative index of soil surface wind erosion instability. It is possible to quantitatively estimate and compare wind erosion stability of any soil surface and air stream influence degree on it, as well as simplify wind erosion intensity calculation at any wind velocity, with use of derived complex characteristics.

*Поступила 1 ноября 2012 г.*