

КРИТЕРИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЧВ РАЗМЫВУ

К. Г. Моисеев

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт
Гражданский пр., 14, Санкт-Петербург, 195220
E-mail: Kir_moiseev@mail.ru

Поступила в редакцию 17 ноября 2014 г., принята к печати 08 декабря 2014 г.

Для решения задач оценки эффективности агротехнических и гидромелиоративных мероприятий по охране почв от эрозии необходимо располагать количественными, численными критериями. Способ формализации качественных или полуколичественных представлений, поиска класса аналогичных физических явлений и физического моделирования в почвоведении и физике почв предоставляет теория подобия. Данная работа использует метод анализа размерности теории подобия для исследования, обобщения и моделирования класса физических явлений устойчивости почв к водной эрозии. В работе продемонстрированы возможности анализа размерности теории подобия для получения однозначных решений многопараметрических функций.

Ключевые слова: теория подобия, анализ размерности, сопротивление сдвигу, сцепление почв, агротехнические мероприятия, защита почв от водной эрозии.

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество способов формализации и количественного описания качественных представлений в почвоведении и физике почв: методы цветовых шкал и индикации (Сурин и др., 2012), логистического моделирования, использование геометрического среднего и нормирования, или теории нечетких множеств (Моисеев, 2011а, б), а также методы статистического моделирования. Моделирование является мощным средством анализа и синтеза сложных процессов и явлений. Однако если результаты, полученные в модельных исследованиях, не могут быть перенесены пересчетом на натурные системы в реальные условия, моделирование оказывается бесполезным с практической точки зрения.

Теория подобия как инструмент моделирования недостаточно, по мнению автора, применяется в физике почв. Многие исследователи для построения моделей предпочитают использовать методы многофакторного регрессионного анализа, ссылаясь на дискретность почвы или грунта как физической системы. Известно, что составить дифференциальные уравнения физических процессов в дискретной системе практически невозможно. Отчасти разделяя данное мнение, автор считает нужным добавить, что при исполь-

зовании методов теории подобия такой подход вовсе не является обязательным. В случае, когда составление дифференциальных уравнений не представляется возможным, применяется метод анализа размерностей теории подобия. Чтобы использовать анализ размерности физических параметров, определяющих некоторый физический процесс, необходимо осуществить предварительный отбор данных параметров на основе общезначимых представлений.

Для количественной оценки эффективности агротехнических, мелиоративных и иных мероприятий по охране почв от эрозии предлагалось (Куртнер, Усков, 1988) использовать критерий вида:

$$\eta = 1 - \frac{\tau_i - T_i}{\tau_0 - T_0},$$

где $(\tau_i - T_i)$ – показатель результатов i -й хозяйственной деятельности по защите поля от эрозии; $(\tau_0 - T_0)$ – показатель потенциальной подверженности поля эрозии.

Для случаев, когда мероприятия дают положительный защитный эффект, $\eta > 1$, условие $\eta = 1$ указывает на неустойчивое состояние системы.

Для расчёта численных значений критерия η необходимо идентифицировать параметры τ и T . В данной работе решается задача идентификации параметров τ и T методами анализа размерности теории подобия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Способ установления сдвигового напряжения T как величины, определяющей силовое воздействие водного или ветрового потока на поверхность почвы, известен из задачи о пограничном слое в динамике сплошных сред. Формула для рейнольдсова напряжения сдвига пристеночного слоя предложена ещё Буссинеском (Лойцянский, 1970):

$$T = \rho \cdot k \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y \rightarrow 0},$$

где k – коэффициент турбулентной вязкости; $\frac{\partial u}{\partial y}$ – производная горизонтальной составляющей скорости водного (ветрового) потока; ρ – плотность среды.

При определении сопротивления сдвига почв τ экспериментальные методы используются всякий раз, когда необходимо установить его величину. Сопротивление сдвига почв является чрезвычайно динамичной характеристикой и зависит от динамичных по своей природе параметров физического состояния почвы. Оценить величину сопротивления сдвига до проведения опыта весьма сложно (Кузнецов, 1981; Моисеев, 2002), но указанная задача является актуальной при использовании критерия η для оценки эффективности агротехнических мероприятий.

Для предсказания поведения конкретных дисперсных систем (почв и грунтов) при сдвиге в лабораторных и полевых условиях без проведения дополнительных сдвиговых испытаний необходимо получить на основе некоторого первичного экспериментального материала критериальную зависимость для сопротивления сдвига почв. Такой подход возможен (Мацепуро, 1968; Моисеев, 1990; Моисеев, Иванова 2000). Известен закон Ш.Кулона (Амонтона) для сопротивления сдвига почв и грунтов (Цытович, 1983):

$$\tau = tg \varphi \cdot N.$$

Устойчивость почвы (грунта) против внешних воздействий определяется ее физико-механическими свойствами. Почву и грунт можно рассматривать как трехфазную систему, состоящую из твердой фазы (скелета), жидкой фазы (почвенной влаги) и газовой фазы, заполняющей объем порового

пространства, свободный от жидкой фазы. Резкие различия в физических свойствах указанных фаз позволяют судить о напряженном состоянии почвы путем раздельного рассмотрения процесса передачи внутренних сил твердой и жидкой фазами. Для такого рассмотрения можно представить существование в почвенной массе двух отдельных систем напряжений: системы напряжений почвенного скелета, определяемой передачей усилия через взаимные контакты почвенных частиц, и системы напряжений заполняющей поры свободной воды, определяемой законами гидромеханики. Принимая недеформируемость твердых частиц матрицы дисперсной системы при определенных внешних воздействиях, например, потоков воды, можно прийти к заключению о возможности деформирования скелета только за счет изменения взаимного расположения твердых частиц, а это, в свою очередь, приводит к изменению связей почвенной влаги с почвенными частицами (Боровков, 1987; Усков, 2002; Моисеев, 2002). Предлагается модель процесса, в которой определено шесть (кроме τ) взаимно независимых параметров: N – внешнее нормальное давление (нагрузка); γ – плотность сложения почвы; d – средний диаметр агрегатов почвы; Ω – удельная поверхность почвы; σ – величина удельной поверхностной энергии дисперсных систем, аналогичная коэффициенту поверхностного натяжения воды (величина σ колеблется от 900 до 74 г·с⁻² в зависимости от минерального состава почв или грунтов; для кварцевых песков $\sigma = 850 \div 900$ г·с⁻² (Дерягин и др., 1985); h – мощность эродированного (размываемого) слоя почвы. Для удобства можно оперировать понятием коэффициента сдвига как отношения $\frac{\tau}{N} = tg \varphi$. Тогда нормированное сопротивление сдвига, или коэффициент сдвига, можно представить как функцию физических параметров:

$$tg \varphi = f(\gamma; d; h; \sigma; \Omega) \quad (1)$$

Для построения безразмерных комплексов (чисел подобия) применим правила и теоремы анализа размерности теории подобия (Кирпичев, 1953; Лойцянский, 1970; Веников и др., 1984; Моисеев, 1990, 2002). Определим количество безразмерных ком-

плексов по второй теореме подобия. Количество взаимно независимых параметров правой части выражения (1) равно 5. Работаем в [СИ]. Количество основных механических единиц измерения системы равно трем (M – масса, L – линейный размер, T – время). Из 5 размерных физических параметров можно построить 2 безразмерных комплекса – следствие второй теоремы подобия (Кирпичев, 1953; Веников и др., 1984). Для этого необходимо скомбинировать отобранные параметры таким образом, чтобы их общая физическая размерность (произведения или частного) была равна 1. Для этого запишем выражение (1) в форме произведения формул размерности параметров, возведенных в некоторую степень (Лойцянский, 1970):

$$M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 = M^\alpha \cdot L^{-2\alpha} \cdot T^{-2\alpha} \cdot$$

$$\cdot L^\beta \cdot L^\gamma \cdot M^w \cdot T^{-2w} \cdot L^{2x} \cdot M^{-x}.$$

Очевидно также, что из параметров d и h сразу можно построить комплекс d/h , откуда следует $\beta = 1$ $\gamma = -1$.

Решим систему уравнений с учётом $\beta = 1$ $\gamma = -1$ относительно степеней, в которые следует возвести формулу размерности физических параметров для построения их безразмерных отношений:

$$M: 0 = \alpha + w - x$$

$$L: 0 = -2\alpha + \beta + \gamma + 2x \Rightarrow$$

$$T: 0 = -2\alpha - 2w$$

$$x = 0$$

$$-\beta = -2\alpha + \gamma$$

$$w = -\alpha$$

без нарушения общности присвоим степени α значение 1 и, учитывая, что $\gamma = -1$, получим для второго отношения: $x = 0$; $\alpha = 1$; $w = -1$; $\beta = 3$ $\gamma = -1$.

$$\text{Имеем: } 1 = \gamma^1 \cdot d^3 \cdot h^{-1} \cdot \sigma^{-1} \text{ или } \frac{\gamma \cdot d^3}{\sigma \cdot h}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Комплекс $\frac{\gamma \cdot d^3}{\sigma \cdot h}$ является произведением двух безразмерных комплексов – $\frac{\gamma \cdot d^2}{\sigma}$ и $\frac{d}{h}$. Из физических соображений

перепишем его в виде $\frac{\sigma \cdot h}{\gamma \cdot d^3}$ или:

$$C = \frac{\sigma}{\gamma \cdot d^2} \quad (2)$$

Данный комплекс физически представляет отношение сил: свободной поверхностной энергии (и порождаемой данной энергией поверхностного силового взаимодействия частиц) к силе тяжести – весомости агрегатов и частиц почвы определенной массы. Интересно, что из анализа размерности следует, что параметр удельной поверхности почв не является существенным для поставленной задачи, его размерность равна 1. Окончательно из физических соображений:

$$\operatorname{tg} \varphi = A \cdot \left[\frac{\sigma \cdot h}{\gamma \cdot d^3} \right]^n$$

Из более ранних работ (Моисеев, 1998; Моисеев, Иванова, 2000) следует, что величина степени n в первом приближении может быть принята равной единице. Получаем решение в логарифмической форме:

$$\lg \tau = \lg A + \lg N + \lg \frac{\sigma \cdot h}{\gamma \cdot d^3}.$$

Для практического использования полученного выражения необходимо установить численные значения коэффициента A и, более точно, степени n , исходя из конкретного экспериментального материала (Моисеев, 1998, 2008). Построенная зависимость должна пройти всестороннюю экспериментальную апробацию.

В условиях набегающего на почву водного потока силы сцепления между частицами почвы, определяемые комплексом [2], противодействуют динамическим силам, существующим в данных условиях в воде. Поэтому необходимо, по мнению автора, учитывать еще два критерия подобия – число Вебера (We) и критерий подобия Рейнольдса (Re):

$$We = \frac{\rho \cdot L \cdot V^2}{\sigma_s}; \quad Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\eta},$$

где ρ – плотность воды (жидкости); L – характеристический линейный размер (примем $L = h = d$); V – скорость набегающего потока воды (жидкости); η – динамическая вязкость воды (жидкости).

По правилам теории подобия, произведение или частное критериев подобия также

являются критерием подобия. Скомбинировав комплексы We , Re и C , получим:

$$C_1 = \frac{\eta \cdot V}{\gamma \cdot d}.$$

Комплекс C_1 – критерий устойчивости почв и грунтов к размыву. Он может найти применение в гидротехническом строительстве и мелиорации почв, а также в инженерной геологии при решении задач моделирования устойчивости береговых линий. Процессы размыва почв и разрушения берегов водоема будут происходить аналогично там, где будут равны численные значения критерия C_1 наряду с подобием численных значе-

ний других критериев, например, критерия Фруда.

ВЫВОДЫ

На основе применения анализа размерности теории подобия получена критериальная зависимость, раскрывающая физическую сущность процессов сопротивления сдвигу в процессе водной эрозии почв.

Подтверждена тесная взаимосвязь сопротивления сдвигу почв при эрозии с энергетическим состоянием поверхности контакта частиц почвы, то есть с ее минералогическим составом, энергетическим состоянием почвенной влаги и типом почвенной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боровков В.. 1987. Природа сил сцепления в водонасыщенных грунтах // Гидротехнические исследования и расчеты трубопроводных систем каналов и портовых сооружений. М. С. 33–35.
- Веников В. А., Веников Г. В. 1984. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа. 439 с.
- Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. 1985. Поверхностные силы. М.: Наука. 399 с.
- Кирпичев М. В. 1953. Теория подобия. М.: АН СССР. 96 с.
- Кузнецов М. С. 1981. Противозерозионная стойкость почв. М.: МГУ. 135 с.
- Куртнер Д. А., Усков И. Б. 1988. Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеиздат. 264 с.
- Лойцянский Л. Г. 1970. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 904 с.
- Мацепуро В. М. 1968. Исследование закономерностей сопротивления почв и грунтов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М. 46 с.
- Моисеев К. Г. 1990. Принципы построения численных критериев подобия физических процессов в почве // Математическое и программное обеспечение задач управления агроэкосистемами (Сборник научных трудов). ВАСХНИЛ, АФИ (Брежнев А. И., Полуэктов Р. А. – ред.). Л. С. 103–109.
- Моисеев К. Г. 1998. Метод расчета коэффициента трения сыпучих масс при структурном сопротивлении сдвигу / Агрофизические методы и приборы. Т. 3. СПб. С. 111–117.
- Моисеев К. Г., Иванова К. Ф. 2000. Применение теории подобия при изучении сдвига почв. Почвоведение. 10: 1233–1237.
- Моисеев К. Г. 2002. Применение теории подобия в исследованиях физико-механических свойств почв. Диссертация на соискание ученой степени кандидата с/х наук. АФИ РАСХН. СПб. 120 с.
- Моисеев К. Г. 2008. Определение удельной поверхности на основе величины гигроскопической влажности. Почвоведение. 7: 845–849.
- Моисеев К. Г. 2011а. К оценке физического состояния дерново-подзолистых почв. Агрофизика. 1:38–43.
- Моисеев К. Г. 2011б. Исследование агрофизических свойств почв Северо-запада Российской Федерации. АФИ РАСХН. 48 с.
- Сурин В. Г., Моисеев К. Г., Курашвили А. Е. 2012. Возможности использования гиперспектрометра «Лептон» для мониторинга состояния почвенно-растительного комплекса. Агрофизика. 4 (8): 34–44.
- Усков И. Б. 2002. О критериях подобия физико-механических свойств почв / Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям (Материалы Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Почвенного института им. В. В. Докучаева). С. 43–44.
- Цытович Н. А. 1983. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 396 с.