

УДК 631.43

Болотов А.Г., канд.с.-х.наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», г. Барнаул

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ  
С ПОМОЩЬЮ РЕОМЕТРА<sup>1</sup>**

*В работе представлена усовершенствованная методика определения реологических свойств суглинистых почв с помощью модульного реометра. Предложен аналитический способ расчета интегральной величины коэффициента разрушения почвы, который можно рекомендовать для упрощения рутинных операций при вычислении этой величины. Получена аппроксимационная формула для нахождения коэффициента разрушения почвы, экспериментальная проверка которой показала хорошую сходимость с расчетными данными.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЧЕРНОЗЁМ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТЫЙ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ, МОДУЛЬНЫЙ РЕОМЕТР, МЕТОД АМПЛИТУДНОЙ РАЗВЕРТКИ, ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ, НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА, МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, МОДУЛЬ ВЯЗКОСТИ

UDC 631.43

Bolotov A.G., Cand.Agr.Sci., Associate Professor,

Altai State Agricultural University, Barnaul

**METHOD OF MEASUREMENT SOIL RHEOLOGICAL PROPERTIES  
WITH A RHEOMETER**

*The paper discusses an improved method of determining the rheological properties of loamy soil with the modular rheometer. An analytical method of calculation of the integral value of the coefficient of destruction of the soil, which can be recommended to simplify routine operations in the calculation of this value. Approximation formula for the coefficient of soil degradation, experimental test which showed good agreement with the calculated data.*

KEY WORDS: LOAMY CHERNOZEM, SOIL RHEOLOGICAL PROPERTIES, MODULAR RHEOMETER, AMPLITUDE SWEEP TEST (AST), YIELD POINT, SHEAR STRESS, STORAGE MODULUS, LOSS MODULUS.

**Введение.** При изучении реологических свойств почв в отечественном почвоведении обычно используются ротационные вискозиметры и реометры с цилиндрическими измерительными устройствами [1-4]. Однако при исследовании средне и тяжелосуглинистых почв на данных устройствах возникают ограничения на их применение. Также отсутствует возможность использования ненарушенных почвенных образцов естественного сложения. В связи с этим для исследования энергетического состояния структурных связей среднесуглинистых черноземов нами был

использован метод амплитудной развертки (AST) с измерительной системой параллельных плато у которого отсутствуют вышеуказанные ограничения.

Метод амплитудной развертки относится к группе методов динамических испытаний, заключающихся в том, что вместо приложения к образцу постоянного напряжения и измерения реологических характеристик в режиме установившегося течения образец подвергают осциллирующим напряжениям или деформациям, например синусоидальной функцией вре-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, № 12-04-90862

мени. Динамические испытания, при которых реометр измеряет зависимость деформации от времени, представляют собой иной подход к измерению вязкоупругости, чем метод ползучести-восстановления. Оба вида испытаний дополняют друг друга, так как одни аспекты вязкоупругости хорошо описываются динамическими испытаниями, а другие – ползучестью и восстановлением. В процессе динамических испытаний вязкоупругих тел не только не происходит механического разрушения образцов, но и сохраняется их внутренняя структура. С реологической точки зрения структура испытуемых образцов находится как бы в состоянии покоя [5].

**Методика измерений.** Исследования реологических свойств почв были проведены на модульном реометре *MCR-302*, с использованием программного обеспечения *RHEOPLUS/32 V3.60*. При этом использовалась измерительная система «пластина-пластина» *PP25* с расстоянием между пластинами *2 мм*. Для поддержания постоянной температуры образца во время опыта применялась система термостабилизации на элементах Пельтье *P-PTD200*.

Для каждого образца измерялись следующие параметры: механическое напряжение, (%); напряжение сдвига, (*Па*); модуль упругости (накоплений), (*Па*); модуль вязкости (потерь), (*Па*); коэффициент демпфирования (-); угол изгиба, (*мрад*); момент силы, (*мкНм*).

Термин «модуль накопления» указывает на то, что энергия напряжения была временно запасена в процессе испытания, но она может быть впоследствии возвращена. Термин «модуль потерь» говорит о том, что энергия, использованная для инициирования течения, необратимо перешла в теплоту («потеряна») [5].

Параметры теста амплитудной развертки (*AST*) задавались следующие: расстояние от пластины до основания *D = 2 мм*, пластина радиусом *R = 25 мм*, деформация сдвига  $\gamma = 0,0001 \dots 100\%$ , угловая частота  $\omega = \pi \text{ с}^{-1}$  ( $F = 0,5 \text{ Гц}$ ), число точек

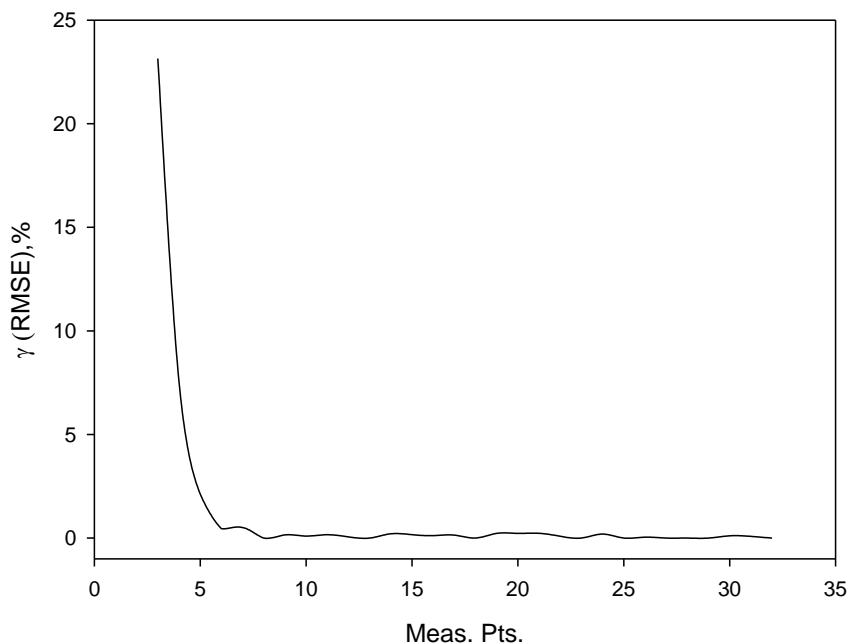
измерения *30*, продолжительность опыта около *15 мин*.

**Результаты и обсуждение.** На начальном этапе эксперимента значения напряжения сдвига, задаваемые реометром, имеют значительные колебания. Поэтому экспериментальные данные, полученные в начальный момент времени, при незавершившемся переходном процессе учитывать нельзя. Для выявления критерия окончания переходного процесса было проанализировано *14* образцов чернозема выщелоченного с заданием *30* получаемых экспериментальных точек. Было получено, что максимальная относительная погрешность напряжения сдвига составила *23,2 %* для первой экспериментальной точки, для которой характерна наибольшая нестабильность. Далее величина погрешности уменьшается и, начиная с шестой точки, что соответствует величине напряжения сдвига *0,001%* на относительной логарифмической шкале, не превышает *0,2 %* в течение всего эксперимента (рис.1). Исходя из этого, рекомендуется анализировать полученные данные напряжения сдвига, начиная с величины *0,001%* в логарифмическом масштабе.

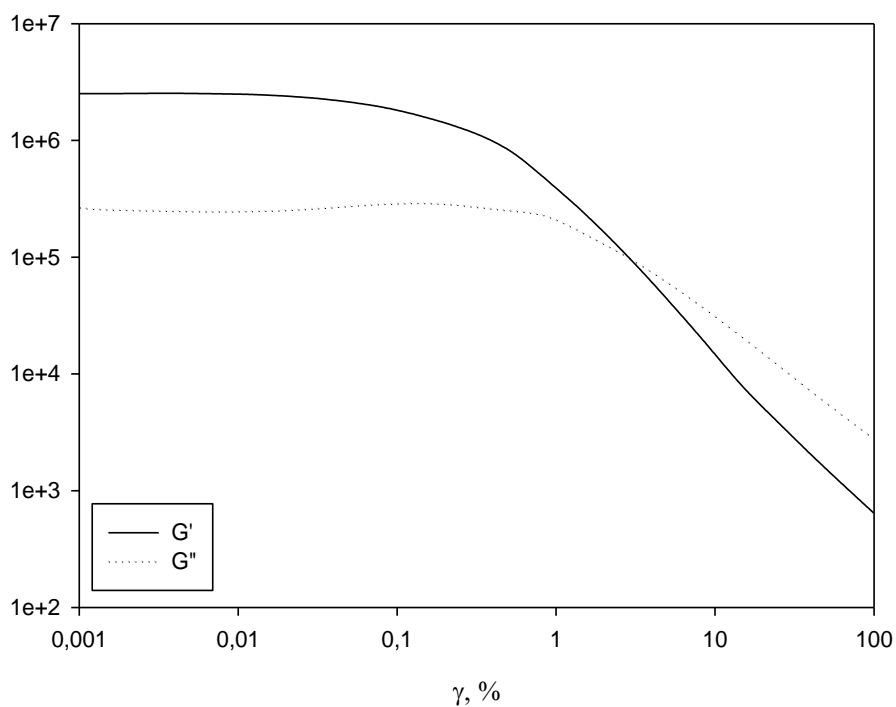
Вязкоупругие вещества, к которым относится влажная почва, вступают в реакцию с временной задержкой, которая выражается углом сдвига фаз  $\delta$ . Исходя из этого, коэффициент разрушения  $\tan \delta$  описывает отношение модуля вязкости (динамический модуль вязкости)  $G''(\text{Па})$  к модулю упругости (динамический модуль упругости)  $G'(\text{Па})$  [6, 7]:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$$

Этот параметр имеет преимущество перед параметрами,  $G'$  и  $G''$  или пределом деформации  $\gamma_L$ , поскольку он представляет более подробные и четкие количественные изменения жесткости. Если  $\tan \delta = 1$ ,  $G' > G''$ , то почва имеет «упругое состояние». Вязкое состояние наступает, когда  $\tan \delta = 1$   $G'' > G'$  (рис. 2).



**Рис.1. Зависимость относительной среднеквадратичной ошибки (RMSE) напряжения сдвига ( $\gamma$ ) от числа измерений (Meas. Pts)**



**Рис.2. Зависимость значений модулей  $G''$  и  $G'$  (Па) от напряжения сдвига ( $\gamma$ )**

При достижении равенства модулей  $G''$  и  $G'$ , упругие и вязкие части эквивалентны, и точка пересечения кривых  $G''$  и  $G'$  является пределом текучести  $Y_p$ . Если  $\tan\delta > 1$ , то преобладает вязкий характер и

структурное разрушение, при этом деформация почвы на данном этапе является необратимой. Для дальнейшего сравнения рассчитывается интеграл  $Z$  из  $\tan\delta(\gamma)$  равный площади фигуры ограниченной линией  $\tan\delta = 1$  и функцией  $\tan\delta(\gamma)$  (рис.3).

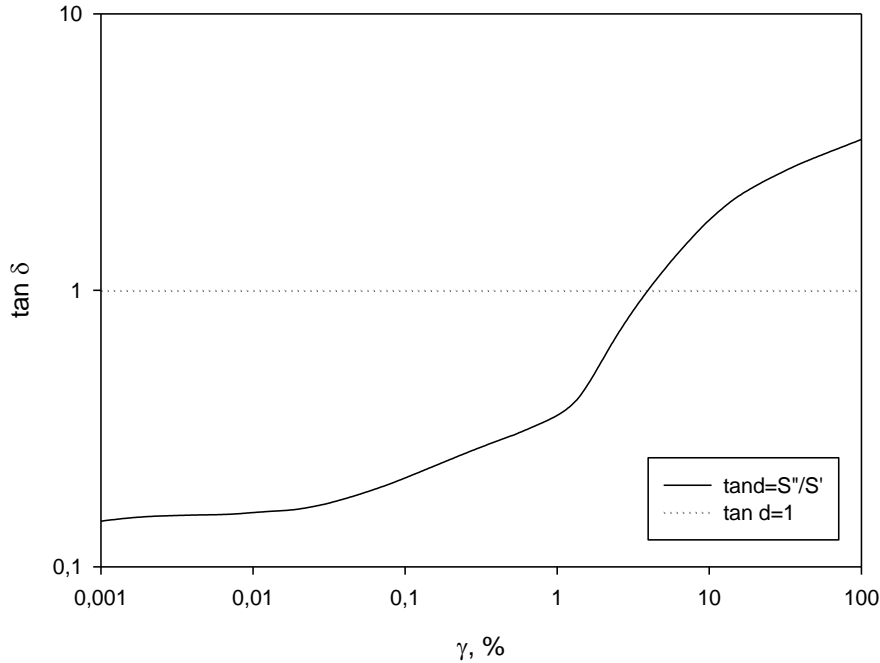


Рис.3. Зависимость коэффициента разрушения  $\tan \delta$  от напряжения сдвига  $\gamma$

Интегральная величина  $Z$  является функцией межчастичных взаимодействий и микромеханического поведения почвы, а также изменений её структурного состояния. Она может быть использована для количественной оценки почв и характеристик их устойчивости к внешним воздействиям.

Обработка больших массивов экспериментальных данных с помощью фирменного ПО, поставляемого в комплекте с реометром представляет собой некоторые трудности и неудобства, поэтому нами была усовершенствована методика нахождения интегральной величины  $Z$  с целью упрощения и автоматизации расчетов этой величины.

Для вычисления определенного интеграла использовали формулу Ньютона-Лейбница. При этом аппроксимировали кривую напряжения сдвига, являющейся **подынтегральной функцией**, четырехпараметрической функцией вида:

$$\tan \delta(\gamma) = \tan \delta_0 + \frac{a}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^b}$$

Зависимость между расчетными и экспериментальными значениями  $\tan \delta(\gamma)$  показывает хорошую сходимость этих значений (рис.4)

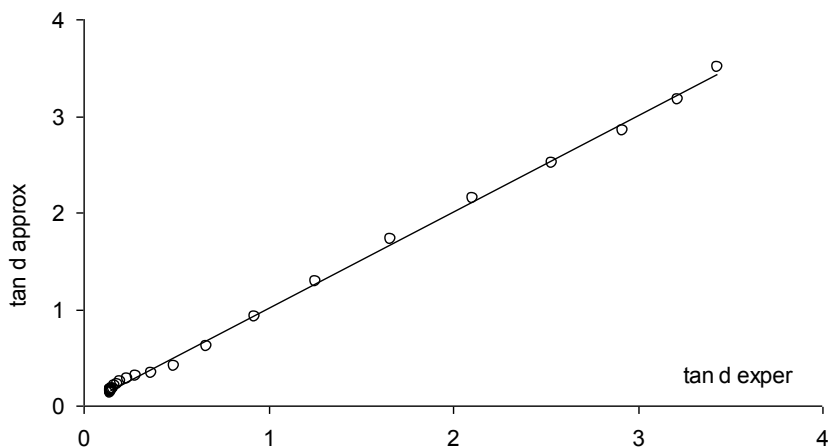


Рис.4. Зависимость между расчетными ( $\tan d \text{ approx}$ ) и экспериментальными значениями ( $\tan d \text{ exper}$ ) величины  $\tan \delta$

Данный способ расчета величины  $Z$  можно рекомендовать для упрощения рутинных операций при вычислении этой величины, а также при отсутствии фирменного программного обеспечения во время обработки данных.

**Заключение.** Динамический метод амплитудной развертки является перспективным для исследования реологических свойств почв любой разновидности нарушенного и ненарушенного сложения и его можно рекомендовать для исследования устойчивости структурного состояния почв механическим воздействиям. Предложенный способ расчета интеграла  $Z$  можно рекомендовать для упрощения рутинных операций при вычислении этой величины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Початкова Т.Н. Реологические подходы к изучению почвенной структуры // Материалы докладов VI Съезда Общества почвоведов имени В.В. Докучаева. – Т. 2. – Карельский научный центр РАН Петрозаводск, 2012. – С. 76–77.
2. Дымов А., Милановский Е., Хайдапова Д., Жангуров Е. Реологические свойства почв горно-

тундрового приполярного Урала // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана. Материалы всероссийской конференции (Сыктывкар, 3-7 июня 2013 г.). – Институт биологии Коми НЦ УрО РАН Сыктывкар, 2013. – С. 303–307.

3. Хайдапова Д., Милановский Е., Честнова В. Реологические свойства черноземов пахотного поля и под лесополосой // V Всероссийская научная конференция по лесному почвоведению с международным участием. – Разнообразие лесных почв и Биоразнообразие лесов Пущино (Московская обл.), 2013. – С. 56–58.

4. Початкова Т.Н., Николаева И.В. Реологические свойства дерново-подзолистой почвы // Материалы докладов VI Съезда Общества почвоведов имени В.В. Докучаева. – Т. 2. – Карельский научный центр РАН Петрозаводск, 2012. – С. 55–57.

5. Schramm G. Einführung in Rheologie und Rheometrie. Auflage. Haake GmbH. – Karlsruhe, 2002, – 360 p.

6. Mezger T. The Rheology-Handbook – For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers. Vincentz Verlag. – Hannover, 2002, – 252 p.

7. Markgraf W., Horn R., Peth S. An Approach to Rheometry in Soil Mechanics: Structural Changes in Bentonite, Clayey and Silty Soils // Soil and Tillage Research 91. – 2006. – P. 1-14.

