
АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

**Возможность применения реологических исследований
при определении структурно-механических свойств почвы**

Денис Викторович Доня[✉], Юлия Владиславовна Устинова,
Максим Валерьевич Просин, Ренат Салимович Хамитов,
Светлана Михайловна Хамитова, Юлия Александровна Мыркшина

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: priap@rgau-msha.ru

Аннотация

Приведены исследования реологических свойств образцов модельных почв при различной влажности с целью определения возможности повышения точности в определении реологических уравнений течения путем использования для обработки экспериментальных данных и кривых течения с применением программного продукта со встроенным математическим аппаратом. Исследованием структурно-механических свойств в процессе его деформирования занимается реология – наука о течении и деформации материалов. Исследование реологических свойств почвы позволит проследить характер межчастичных взаимодействий в почве и, кроме того, определить их структурно-механические свойства – такие, как вязкость, упругость, пластичность, предельное напряжение сдвига и т.п. Полученные результаты говорят о том, что все образцы модельных почв могут быть отнесены к структурно-вязким системам, для описания деформационного поведения которых применимо реологическое уравнение Оствальда-де-Виля. Применив для обработки результатов экспериментальных данных, полученных методом ротационной вискозиметрии программного продукта, можно получить значения коэффициентов, входящих в реологическое уравнение, которые с соответствующей точностью описывают деформационное поведение исследованных образцов.

Ключевые слова

Реология, вискозиметрия, кривые течения, реологические уравнения, ньютоновская жидкость, индекс течения, ошибка аппроксимации

Для цитирования

Доня Д.В., Устинова Ю.В., Просин М.В., Хамитов Р.С. и др. Возможность применения реологических исследований при определении структурно-механических свойств почвы // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2025. № 6. С. 14–24.

**Potential applications of rheological studies
in determining soil structural-mechanical properties**

**Denis V. Donya[✉], Yulia V. Ustinova, Maksim V. Prosin, Renat S. Khamitov,
Svetlana M. Khamitova, Yulia A. Myrksina**

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

[✉]**Corresponding author:** priap@rgau-msha.ru

Abstract

This study presents investigations into the rheological properties of model soil samples at various moisture contents. The aim was to determine the feasibility of enhancing the accuracy of rheological flow equation determination by employing a software product with an integrated mathematical apparatus for processing experimental data and flow curves. Rheology, the science of flow and deformation of materials, is concerned with the study of structural-mechanical properties during the deformation process. Investigating the rheological properties of soil will allow for tracing the nature of inter-particle interactions within the soil and, furthermore, for determining its structural-mechanical properties, such as viscosity, elasticity, plasticity, ultimate shear stress, and others. The obtained results indicate that all model soil samples can be classified as structural-viscous systems, for which the Ostwald-de Waele rheological equation is applicable for describing their deformation behavior. By utilizing a software product to process experimental data obtained by rotational viscometry, it is possible to derive the values of the coefficients within the rheological equation, which accurately describe the deformation behavior of the investigated samples.

Keywords

Rheology, viscometry, flow curves, rheological equations, Newtonian fluid, flow index, approximation error

For citation

Donya D.V., Ustinova Yu.V., Prosin M.V., Khamitov R.S. et al. Potential applications of rheological studies in determining soil structural-mechanical properties. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 14–24.

Введение
Introduction

С древних времен и до настоящего времени получение целого ряда пищевых продуктов неизменно связано с возделыванием почвы [1, 8, 13]. В течение всего этого времени менялись, как правило, только инструменты, при этом неизменным остается сам принцип возделывания. История развития инструмента для возделывания почвы продолжается уже многие сотни лет, при этом на протяжении всего этого времени развитие направлено на снижение трудозатрат при работе и, следовательно, на снижение себестоимости обработки. В последнее время при проектировании почвообрабатывающих инструментов применяют научный подход, который, помимо прочего, акцентирует внимание на структуре и свойствах обрабатываемого объекта [4, 7, 12, 13].

Почву можно отнести к многокомпонентной дисперсной системе, обладающей различными структурно-механическими свойствами [2, 9], причем эти свойства

не только будут отличаться в различных регионах страны, но даже в пределах одного поля возможны различия в зависимости от влажности, населяющих ее бактерий и организмов и т.д. Учет структурно-механических свойств почвы позволит более научно обоснованно подойти к решению не только вопроса проектирования почвообрабатывающей техники, но и других вопросов, касающихся сельскохозяйственной деятельности [3, 11].

Исследованием структурно-механических свойств в процессе его деформирования занимается реология – наука о течении и деформации материалов. Исследование реологических свойств почвы позволит проследить характер межчастичных взаимодействий в почве и, кроме того, определить их структурно-механические свойства – такие, как вязкость, упругость, пластичность, предельное напряжение сдвига и т.п. [5, 12].

Реологические исследования можно подразделить на исследования в статическом состоянии, например, с применением инденторов различного типа, и исследования деформационного поведения материала во времени. Для исследований второго типа применяются вискозиметры различного типа (капиллярные, шариковые, ротационные). Выбор типа вискозиметра зависит от требуемых задач и от исследуемого материала [3, 10].

Результатом измерений на вискозиметре является, как правило, так называемая «кривая течения», которая графически отображает деформационное поведение материала при заданных внешних воздействиях и строится в координатах «Напряжение сдвига – скорость сдвига» [3, 10]. По характеру полученной кривой течения исследуемый материал можно отнести к тому или иному типу реологических моделей и получить уравнение, описывающее поведение материала под нагрузками. Такое уравнение носит название «Реологическое уравнение». Однако процесс обработки экспериментальных данных и получение реологического уравнения – процесс сложный, и зачастую он дает не совсем точные результаты [5, 13]. Это связано с необходимостью графической обработки кривых течения оператором, что, несомненно, будет влиять на точность и достоверность результатов обработки. Следовательно, для повышения точности и субъективности обработки реологических исследований необходимо привлечение программного продукта со встроенным математическим аппаратом обработки данных.

Цель исследований: определение возможности повышения точности определения реологических уравнений течения путем использования для обработки экспериментальных данных и кривых течения с применением программного продукта со встроенным математическим аппаратом.

Методика исследований

Research method

Исследования проводились в лаборатории кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2024–2025 гг. В качестве объектов исследований выбраны модельные образцы почвы при разных значениях влажности ($W = 20\dots60\%$), обладающие сходным составом по элементарным почвенным частицам (примерный состав образцов: физической глины – 28,1%; песка – 10,0%; крупной пыли – 34,9%; средней и мелкой пыли – 16%). Измерение производили по известной методике на ротационном вискозиметре Brookfield Ametek (США) серии DV-E [6].

Для каждого измерения подготавливали требуемый объем образца с заданной влажностью и с определенной температурой. Подготовленный образец помещали

в измерительный стакан объемом 600 мл и устанавливали в прибор. Затем подобранный шпиндель вискозиметра погружали в исследуемый образец и запускали прибор. Измерения проводились на всем диапазоне скоростей сдвига с фиксацией результатов измерения для каждой скорости. Таким образом, были получены данные для построения кривых течения для всех образцов с разной влажностью.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась как в среде Microsoft Office Excel 2021, так и с помощью специализированного программного продукта «Виртуальная модель кривых течения».

Обработка экспериментальных данных графическим методом в среде Microsoft Office Excel осуществляется следующим образом: все полученные результаты вносятся в таблицу, после чего по ним строится кривая течения в координатах «Напряжение сдвига – скорость сдвига». Помимо этого, по экспериментальным значениям рассчитываются значения вязкости для каждой скорости сдвига. Это необходимо для построения зависимости вязкости от скорости сдвига. По характеру полученных кривых (рис. 1) можно выделить следующие виды реологических тел [3, 5, 8, 13]:

- ньютоновская жидкость;
- псевдопластическая среда;
- структурно-вязкая среда;
- линейное пластичное тело;
- нелинейное пластичное тело.

Каждому из представленных реологических тел соответствует свое реологическое уравнение, которое связывает напряжения и деформации, возникающие при нагружении. В таблице 1 представлены эти реологические уравнения [3, 7, 9].

Определение входящих в реологические уравнения коэффициентов выполняется графическим методом, для чего необходимо представить графики течения в логарифмических шкалах. Однако данный процесс является трудоемким и не обеспечивает достаточно достоверной обработки результатов измерений, чем вносятся погрешности в конечное реологическое уравнение деформации исследуемого образца.

Для уменьшения времени и снижения трудоемкости обработки результатов экспериментальных исследований, для повышения точности получаемых реологических уравнений была создана программа «Виртуальная модель кривых течения». Данная программа позволяет в реальном времени получать различные реологические уравнения с определением ошибки аппроксимации [5].

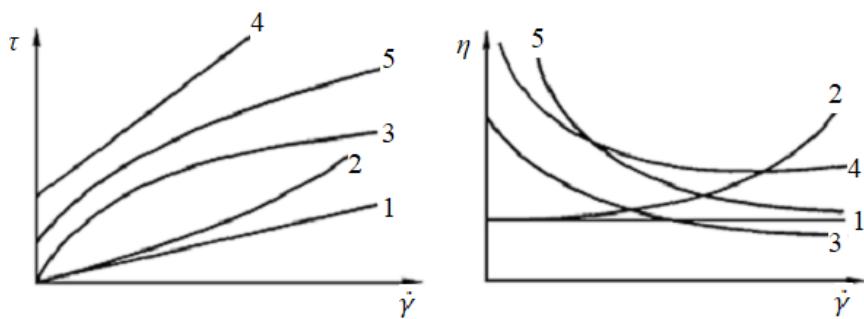


Рис. 1. Общий вид реологических кривых течения [3]:
 1 – ньютоновская жидкость; 2 – псевдопластическая среда; 3 – структурно-вязкая среда;
 4 – линейное пластичное тело; 5 – нелинейное пластичное тело

Figure 1. General view of rheological flow curves [3]:
 1 – Newtonian fluid; 2 – pseudoplastic medium; 3 – structural-viscous medium;
 4 – linear plastic body; 5 – non-linear plastic body

Таблица 1
Основные реологические уравнения
Table 1
Basic rheological equations

№	Реологическое тело	Реологическое уравнение
1	Ньютоновская жидкость	$\tau = \eta / \dot{\gamma}$
2	Псевдопластическая среда	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$, при $0 < n < 1$
3	Структурно-вязкая среда	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$, при $n > 1$
4	Линейное пластичное тело	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}$
5	Нелинейное пластичное тело	$\tau = \tau_0 + B_0 \dot{\gamma}^n$

Примечание. τ – напряжение сдвига, Па; τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; η – вязкость, Па·с; n – индекс течения; K – коэффициент консистенции; $\eta_{\text{пл}}$ – пластическая вязкость; B_0 – коэффициент, пропорциональный вязкости.

Результаты и их обсуждение Results and discussion

По данным, полученным в результате проведенных исследований реологических свойств образцов модельных почв при заданных значениях влажности в среде Microsoft Office Excel, были построены кривые течения, представленные на рисунках 2, 3.

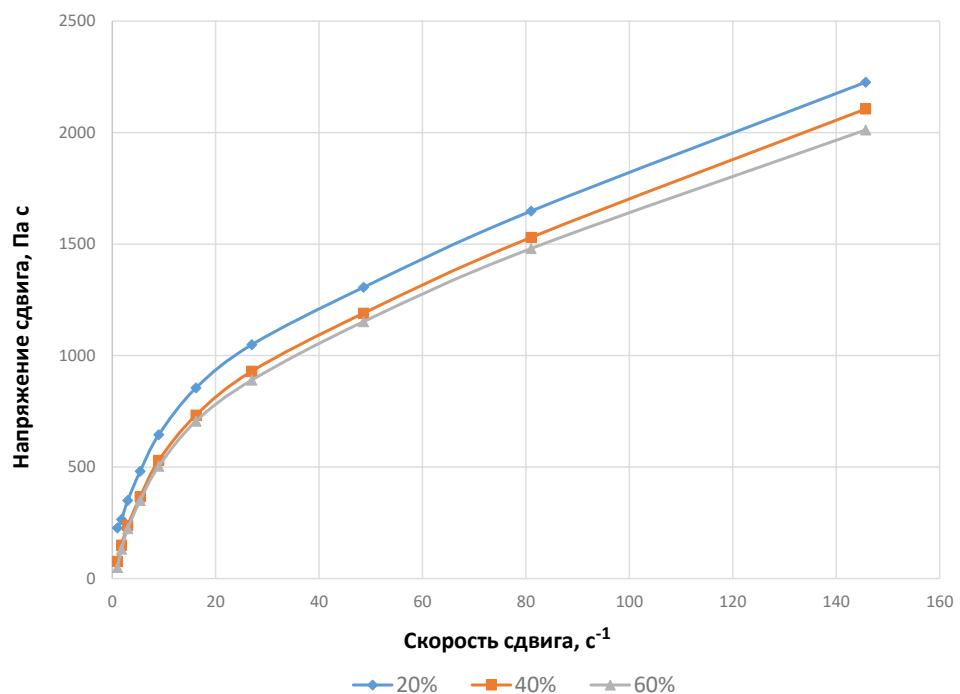


Рис. 2. Кривые течения образцов модельных почв

Figure 2. Flow curves of model soil samples

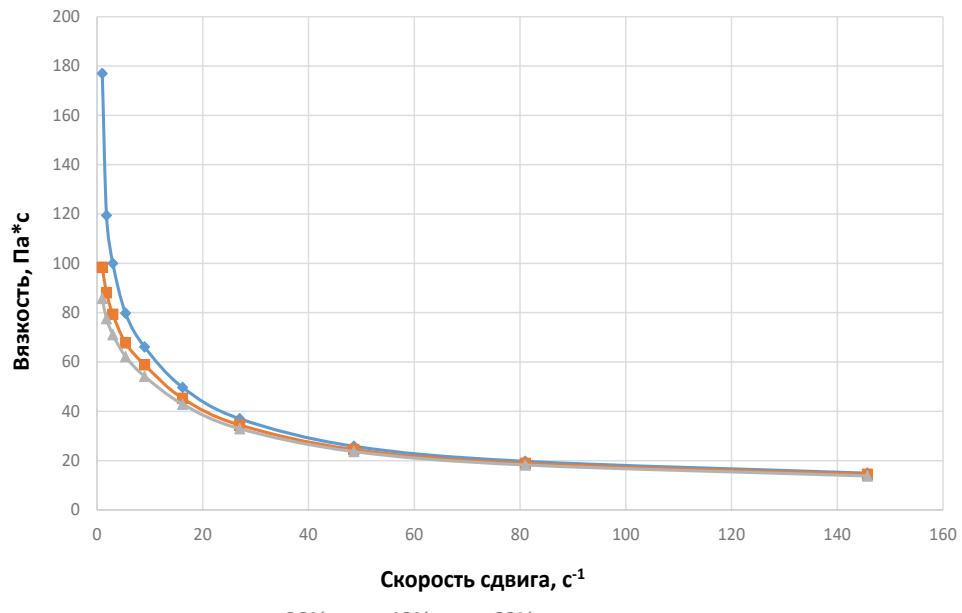


Рис. 3. Кривые вязкости образцов модельных почв

Figure 3. Viscosity curves of model soil samples

Анализируя полученные графические отображения деформационного поведения исследованных образцов модельных почв при разных значениях влажности, выяснили, что они имеют одинаковый характер реологического поведения. При этом с ростом значений влажности образцов снижается их сопротивление сдвиговой деформации, следовательно, значения вязкости так же снижаются. Образцы с влажностью 40 и 60% при малых скоростях деформации имеют довольно сходные значения напряжений сдвига, а при увеличении скорости деформации данное расхождение увеличивается. Это можно отнести к тому, что повышение влажности образцов приводит к снижению межчастичного взаимодействия, которое проявляется при увеличении значений внешнего воздействия.

Проведя анализ полученных кривых течения, можно сделать вывод о том, что все исследованные образцы модельных почв относятся к структурно-вязким средам, для описания реологического поведения которых применимо уравнение Оствальда-де-Виля: $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ при $n > 1$. Для определения значений коэффициентов, входящих в это реологическое уравнение, необходимо перевести данные кривые в логарифмические координаты и затем, выполнив их анализ, получить значения коэффициентов. Однако облегчит данную задачу применение программного продукта. Для этого внесем данные в программу «Виртуальная модель кривых течения» и выберем соответствующее реологическое уравнение, по которому программа проведет обработку данных. Результатом работы программы являются как непосредственно кривая течения, так и реологическое уравнение, описывающее данную кривую, а также среднеквадратическое отклонение и средняя ошибка аппроксимации, по которой можно судить о точности обработки экспериментальных данных. Результаты обработки представлены на рисунке 4.

Реологическое уравнение, описывающее кривую течения каждого из исследуемых образцов, а также их среднеквадратические отклонения и средние ошибки аппроксимации, представлены в таблице 2.

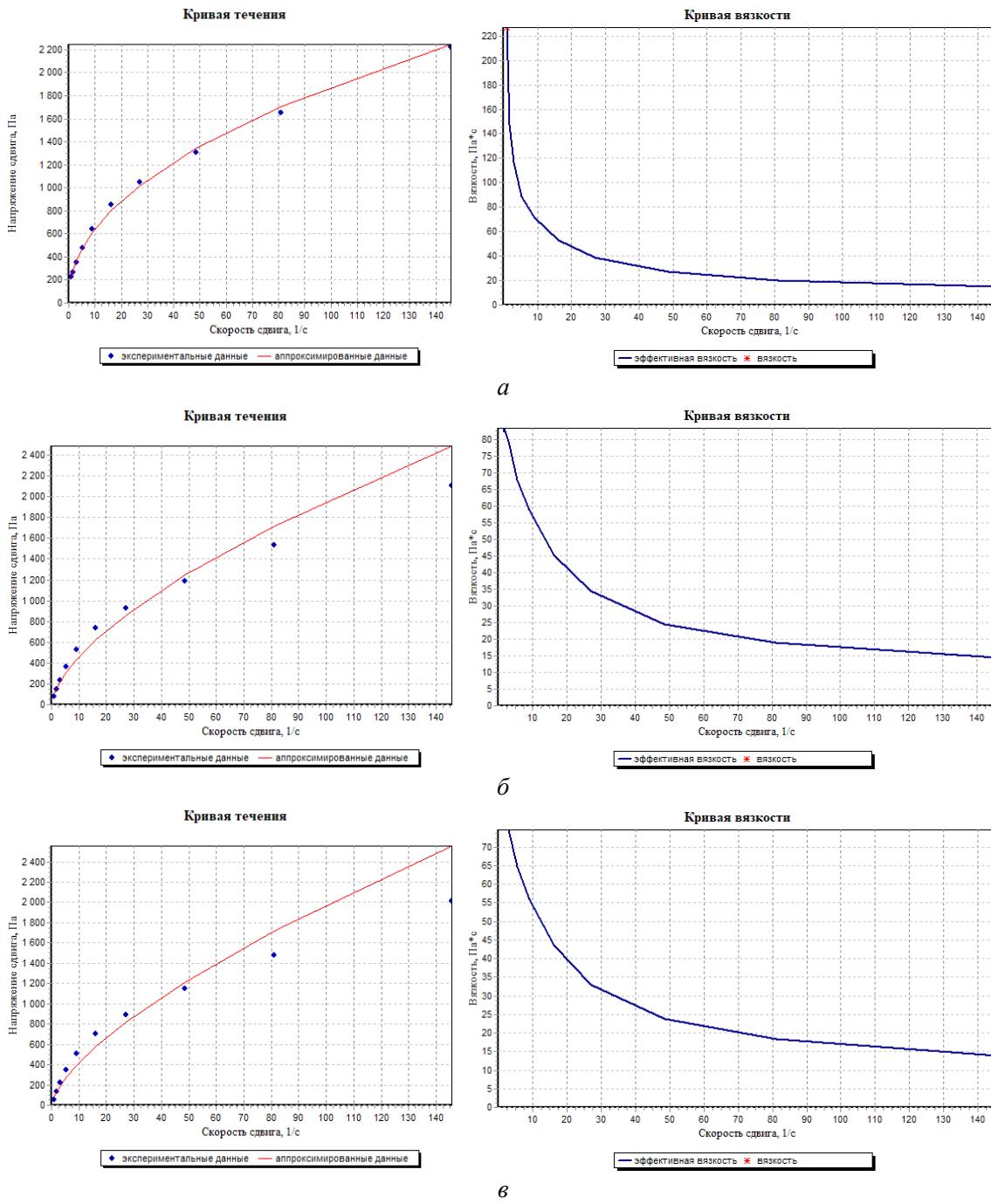


Рис. 4. Результаты обработки экспериментальных данных в программе «Виртуальная модель кривых течения» для образцов влажностью:
а – 20%; б – 40%; в – 60%

Figure 4. Results of processing experimental data in the program “Virtual Flow Curve Model” software for samples with moisture content:
a – 20%; b – 40%; c – 60%

Как следует из таблицы 2, ошибка обработки экспериментальных данных лежит в пределах, допустимых для дальнейшего применения в исследовательских или конструкторских целях.

Таблица 2

**Результаты обработки экспериментальных данных
в программе «Виртуальная модель кривых течения»**

Table 2

Results of processing experimental data in the “Virtual Flow Curve Model” software

Влажность, %	Реологическое уравнение	Среднеквадратическое отклонение	Средняя ошибка аппроксимации
20	$\tau = 217,83 \cdot \dot{\gamma}^{0,47}$	1073,97	3,83
40	$\tau = 107,87 \cdot \dot{\gamma}^{0,63}$	1550,58	4,47
60	$\tau = 87,53 \cdot \dot{\gamma}^{0,68}$	2122,03	4,79

Выводы

Conclusions

В результате проведенных исследований реологических свойств модельных образцов почвы при разных значениях влажности (от 20 до 60%) были получены их кривые течения, отображающие деформационное поведение под действием внешних нагрузок. При анализе полученных графических отображений кривых течения исследованных образцов модельных почв при разных значениях влажности отмечен одинаковый характер их реологического поведения. При этом с ростом значений влажности образцов снижается их сопротивление сдвиговой деформации, следовательно, значения вязкости также снижаются.

Образцы с влажностью 40 и 60% при малых скоростях деформации имеют довольно сходные значения напряжений сдвига, а при увеличении скорости деформации данное расхождение увеличивается. Это можно объяснить тем, что повышение влажности образцов приводит к снижению межчастичного взаимодействия, которое проявляется при увеличении значений внешнего воздействия.

Помимо этого, можно сделать вывод о том, что все они могут быть отнесены к структурно-вязким системам, для описания деформационного поведения которых применимо реологическое уравнение Оствальда-де-Виля: $\tau = \cdot \gamma^n$ при $n > 1$. Применив для обработки результатов экспериментальных данных, полученных методом ротационной вискозиметрии программного продукта «Виртуальная модель кривых течения», получили значения коэффициентов, входящих в реологическое уравнение, которые с соответствующей точностью (средняя ошибка аппроксимации – не более 5%) описывают деформационное поведение исследованных образцов.

Таким образом, реологические свойства можно отнести к одному из показателей физического состояния почвы, имеющих как исследовательское, так и практическое значение. Применение полученных реологических кривых течения, а также реологических уравнений позволит более полно понимать суть процессов, происходящих в почве при воздействии на нее внешних воздействий, что в значительной степени полезно как в исследовательских целях, так и при проектировании нового оборудования для обработки почвы и усовершенствования уже имеющегося.

Список источников

1. Хохлов А.В., Гулин В.В. Кривые течения и деформирования нелинейной модели сдвигового течения тиксотропных вязкоупругопластичных сред, учитывающей эволюцию структуры // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2024. № 1. С. 112–143. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.1.10>
2. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes. *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2020;103:108-148. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148>
3. Доня Д.В., Леонов А.А. *Инженерная реология: Учебно-методическое пособие.* Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2009. 124 с.
4. Чудецкий А.И., Заушицена А.В., Родин С.А. и др. Использование современных ростостимулирующих экопрепараторов при микроклональном размножении брусники обыкновенной (*Vaccinium vitis-idaea* L.) // *Лесохозяйственная информация.* 2022. № 2. С. 56–66. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.05>
5. Литвинова И.А. *Компьютерные технологии в реологических исследованиях молочных продуктов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Кемерово, 2012. 18 с. EDN: QHZQEB
6. Клюева В.В. Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор) // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2024. Вып. 121. С. 281–321. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-281-321>
7. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // *Почвоведение.* 2016. № 8. С. 955–963. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
8. Дьяков В.П. О природе сопротивления почвы механической нагрузке // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.* 2018. № 8. С. 184–189. EDN: VQHNXD
9. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017;64:012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
10. Pértille P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agricola.* 2018;75(2):154-162. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267>
11. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A. et al. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research.* 2019;195:104388. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>
12. Zhou L., Hu F., Xu C. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear. *Journal of Soil and Water Conservation.* 2024;38:45-53. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.007>
13. Mezger T.G. *The Rheology Handbook.* 3rd ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2011:28.

References

1. Khokhlov A.V., Gulin V.V. Flow curves and stress-strain curves generated by a nonlinear model for shear flow of thixotropic viscoelastic media accounting for structure evolution. *PNRPU Mechanics Bulletin.* 2024;(1):112-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.1.10>

2. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020;103:108-148. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148>
3. Donya D.V., Leonov A.A. *Engineering rheology: guidelines*. Kemerovo, Russia: Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 2009:124. (In Russ.)
4. Chudetsky A.I., Zaushintsena A.V., Rodin S.A. et al. The use of modern growth-promoting eco-preparations for microclonal propagation of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.). *Forestry Information*. 2022;(2):56-66. (In Russ.) <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.05>
5. Litvinova I.A. *Computer technologies in rheological research of dairy products*: CSc (Eng) thesis. Kemerovo, Russia, 2012:18. (In Russ.)
6. Klyueva V.V. The rheometry approach in modern soil studies: a review. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2024;(121):281-321. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-121-281-321>
7. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovski E.Yu. Rheological properties of typical chernozems (Kursk Oblast) under different land uses. *Pochvovedenie*. 2016;(8):955-963. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
8. Dyakov V.P. On the nature of soil resistance to mechanical stress. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018;(8):184-189. (In Russ.)
9. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017;64:012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
10. Pértille P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agricola*. 2018;75(2):154-162. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267>
11. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A. et al. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research*. 2019;195:104388. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388>
12. Zhou L., Hu F., Xu C. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2024;38:45-53. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.007>
13. Mezger T.G. *The Rheology Handbook*. 3rd ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2011:28.

Сведения об авторах

Денис Викторович Доня, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: priap@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Олия Владиславовна Устинова, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии хранения и переработки продуктов животноводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: tppj@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Максим Валерьевич Просин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»;

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: prosinmv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Ренат Салимович Хамитов, д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры и землеустройства и лесоводства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: r.khamitov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>

Светлана Михайловна Хамитова, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры ландшафтной архитектуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3432-3804>

Юлия Александровна Мырксина, канд. экон. наук, доцент кафедры бухгалтерского учета, финансов и налогообложения, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: myrksina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8023-3183>

Information about the authors

Denis V. Donya, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Processes and Equipment of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: priap@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Yulia V. Ustinova, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Technology of Storage and Processing of livestock Products, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: tppj@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Maksim V. Prosin, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Processes and Equipment of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: prosinmv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Renat S. Khamitov, DSc (Ag), Associate Professor, Professor at the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: r.khamitov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1490-3553>

Svetlana M. Khamitova, CSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Landscape Architecture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3432-3804>

Yulia A. Myrksina, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Accounting, Finance and Taxation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: myrksina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8023-3183>