

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41

УДК 631.171:634.0.384.2

Деформационный механизм уплотнения структурного тела

Кандидаты техн. наук О. Н. Протасеня¹⁾, Л. В. Ларченков¹⁾, инж. М. Л. Протасеня¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для подготовки почвы к посеву сельскохозяйственных культур необходим ряд инженерных конструкций, обеспечивающих качественную ее обработку и защиту от эрозии. Современная техника не вполне соответствует всему комплексу предъявляемых к ней требований. Применение почвообрабатывающей техники для основной обработки почвы направлено на подавление (уничтожение) природной растительности, которая является сильнейшим конкурентом культурным растениям. С другой стороны, растительность на поверхности земли играет роль надежной защиты почвы от эрозии. Уничтожение природной растительности на протяжении всего периода ухода за посевами приводит к тому, что оставшиеся культурные растения не способны защитить почву от эрозии агрессивными природными факторами: дождями ливневого характера и сильными ветрами. Как следствие – в географической (ландшафтной) оболочке происходят процессы разрушения структуры и потеря целых пластов почвы и ее плодородия. Таким образом, техника для основной и дополнительной обработки почвы оказывает двойственное влияние: с одной стороны, производится уничтожение сорняков, с другой – происходит разрушение (эрозия) структуры почвы, профилей ее географической оболочки. За последние 50 лет существенно расширилась область анализа физических процессов, протекающих в почве, получили распространение физические методы исследования ее свойств, увеличилось применение технической аппаратуры в оценке физико-механических характеристик. Однако нет обобщающего исследования по физике почвы, в котором были бы изложены термодинамика, электрофизика и ядерная физика почв. Вместе с тем комплексный подход к изучению такого сложного объекта позволяет понять важнейшую природу ряда процессов, протекающих в почве, и разработать практические мероприятия для повышения ее плодородия и уменьшения эрозии. В статье рассмотрены вопросы деформационного механизма при формировании структуры почвы и уплотнении под воздействием внешних нагрузок: магнитных, электрических, физико-химических, гравитационных и тепловых полей, а также рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Ключевые слова: земля, почва, деформирование, дисперсионные среды, контактное взаимодействие, деформационный механизм, уплотнение, механический состав почвы

Для цитирования: Протасеня, О. Н. Деформационный механизм уплотнения структурного тела / О. Н. Протасеня, Л. В. Ларченков, М. Л. Протасеня // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 29–41. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41

Deformation Mechanism of Structural Body Compression

O. N. Protasenya¹⁾, L. V. Larchenkov¹⁾, M. L. Protasenya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In order to prepare soil for sowing of agricultural crops it is necessary to have a number of engineering structures that ensure its qualitative treatment and protection from erosion. Modern equipment do not fully meet the whole complex of specified requirements. Application of tillage machinery being used for main soil cultivation is directed on suppression (destruction) of natural vegetation which is considered as the strongest competitor to cultivated plants. From the other side, vegetation on the Earth's surface plays an important role for reliable protection of soil from erosion. Destruction of vegetation throughout the whole period of crop tending leads to the fact that the remaining cultivated plants are not able to protect soil from erosion by such natural aggressive factors as rain storms and strong winds. As a consequence, processes of soil structure destruction and losses of entire soil strata and its fertility occur in the geographical (landscape) envelope. Thus, equipment for primary and secondary soil tillage exerts double impact: from one side, killing of weeds takes place, and on the other

Адрес для переписки

Протасеня Марина Леонидовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Protasenya Marina L.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

hand, there is destruction (erosion) of soil structure and profiles of its geographical envelope. The soil, in the understanding of the earth, is the perfect place that gives life to plants and organisms, has a fertility. For the last 50 years analytical scope of physical processes occurring in the soil has been extended, physical methods for investigation of soil properties and application of technical equipment for assessment of physical-mechanical soil characteristics have got widespread use. However, there is no summative investigation on soil physics which includes and reveals thermodynamics, electrophysics and nuclear physics of soils. At the same time an integrated approach for studying such complicated object makes it possible to understand important nature of some processes occurring in the soil and to develop practical measures for fertility improvement and erosion reduction. The paper considers problems pertaining to deformation mechanism while forming soil structure and its compression under influence of external loadings: magnetic, electric, physico-chemical, gravitational and thermal fields and working organs of tillage tools.

Keywords: earth, soil, deformation, dispersion media, contact interaction, deformation mechanism, compression, mechanical composition of soil

For citation: Protasenyа O. N., Larchenkov L. V., Protasenyа M. L. (2018) Deformation Mechanism of Structural Body Compression. *Science and Technique*. 17 (1), 29–41. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41 (in Russian)

Введение

Главная задача обработки земли – уничтожение естественной растительности как опасного для культурных растений сорняка. Самый распространенный механизм обработки – отрезать пласт от массива земли по заданным размерам поперечного сечения и во время движения орудия перевернуть его на 180° растительностью вниз. В результате такой обработки пропадает защитная роль естественной растительности от разрушительных стихийных сил природы (дождя и ветра). Поэтому обработка почвы имеет двойственный результат: с одной стороны, уничтожение естественной растительности, с другой – разрушение, что способствует явлению эрозии и вмешательству в географическую (ландшафтную) оболочку планеты Земля [1, 2].

Биологическая составляющая земли – гумус – образован при участии живых организмов в геохимических процессах, преобразующих химический состав атмосферы, гидросферы и земной коры. Он придает ей черный цвет, плодородие и формирует прочную структуру [3–5]. С целью защиты гумуса от разрушения рассматриваются более совершенные способы обработки почвы.

Процесс обработки почвы, если принимать его как механизм разрушения, представляет сложный вид взаимодействия двух физических тел: полидисперсной (земля) и однородной (металл) систем. Такой способ взаимодействия земли и рабочих органов орудий является контактным, с временным (нестатическим) характером. В расчете надежности и экономичности нуждаются как рабочие органы, так и почвооб-

рабатывающее орудие в целом, сложность расчета которых заключается в том, что деформационный механизм контактного взаимодействия тел не изучен. Для каждого физического тела данный механизм необходимо рассматривать отдельно, так как взаимодействующие тела, находящиеся в равновесии, сильно различаются физико-механическими и физико-химическими свойствами.

Практически все физические тела обладают таким свойством, как структура. Структурное тело (земля) представляет особую группу, которая выделяется из всех физических тел и отличается полидисперсностью, многокомпонентностью и разновидностью структурных элементов, зависящих от природных и климатических условий [7–11].

Весьма сложное строение почвы можно представить в виде матричной модели с взаимодействующими друг с другом природными образованиями (например, газ – жидкость или жидкость – растение, животные и микроорганизмы) (рис. 1) [12–15].

Дисперсная система – образование из двух или большего числа фаз (структурных элементов) с сильно развитой поверхностью раздела между ними. В ней одна из фаз (дисперсная) распределена в виде мелких элементов (кристаллов, пленок или пластинок, капель, пузырьков) в другой – сплошной – фазе (дисперсионной среде). По основной характеристике – размерам (дисперсности) элементов – дисперсные системы делятся на грубо- и тонкодисперсные (коллоиды). Размер первых составляет 10^{-4} см и более, вторых – от 10^{-4} до 10^{-7} см.

Дисперсная система				
Дисперсионная среда	Дисперсная фаза			
	Газовая	Жидкая	Твердая	Биомасса
Газовая	Дисперсная система не образуется	Туман	Дым, пыль	Растения, животные, насекомые
Жидкая		Эмульсии, золи	Суспензии, коллоиды	Растения, бактерии
Твердая		Жидкие включения в твердых телах	Твердые золи (рубиновое стекло)	Корни, мхи, синезеленые водоросли
Биомассовая		Одноклеточные, растения, бактерии	Корни, мхи, синезеленые водоросли	Дисперсная система не образуется

Рис. 1. Дисперсные системы по агрегатному состоянию фаз почвы

Fig. 1. Disperse systems for aggregate state of soil phases

По интенсивности молекулярного взаимодействия фаз бывают лиофильные и лиофобные дисперсные системы – характеристики способности веществ (или образуемых ими структурных элементов) к межмолекулярному взаимодействию с жидкостями. Интенсивное взаимодействие и сильное взаимное притяжение молекул элементов и контактирующей с ними жидкости характеризует лиофильность, а слабое – лиофобность.

В лиофильных системах молекулярное взаимодействие между фазами велико, а удельная свободная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) на межфазной границе очень мала. Эти системы образуются в результате распада более крупных структурных агрегатов в коллоиды при температуре 15–20 °С при межфазном поверхностном натяжении 0,01–0,03 дин·см⁻¹.

В лиофобных коллоидах структурные элементы дисперсной фазы слабо взаимодействуют с окружающей средой. Межфазное натяжение в таких системах на порядок сильнее при той же температуре. Вследствие избытка свободной поверхностной энергии они термодинамически неустойчивы, всегда готовы к распаду. При распаде лиофобного коллоида происходит укрупнение (слипание, слияние) структурных элементов и образование структурных агрегатов. Этот процесс сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Слипание структурных элементов осуществляется через тонкую прослойку жидкой дисперсионной среды вследствие действия слабых молекулярных сил притяжения. Элементы лиофобной коллоидной группы всегда находятся в броуновском движении и при появлении внешней нагрузки (энергии) происходит их слипание или слияние, что приводит к увели-

чению энергии сопротивления внешней нагрузке. Слияние происходит на основе химических реакций и является более прочным, чем при слипании структурных агрегатов. Фактор увеличения сопротивляемости структурных тел внешней нагрузке – их дисперсность [16–20].

Фрагмент полидисперсной среды (почвы) можно представить в отличие от рис. 1 в другом виде – как на рис. 2. На рисунке свободная зона между твердыми элементами относительно велика, поэтому жидкая фаза тоже велика и представлена в виде трех составляющих: прочно связанной, связанной и свободной воды. Твердая фаза – азотный, фосфорный и калийный минералы – представлена минеральными удобрениями NPK.

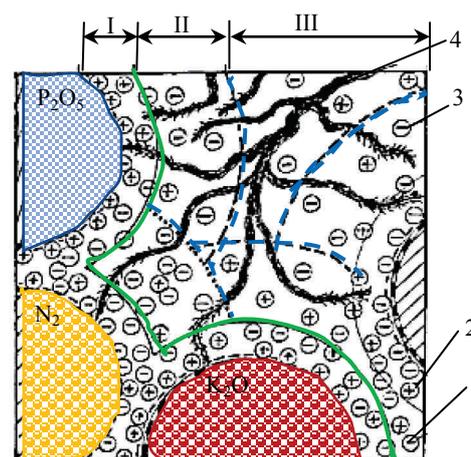

 Рис. 2. Схема взаимодействия структурных элементов почвы:
 I, II, III – прочно связанная, связанная и свободная вода; 1 – анион; 2 – катион; 3 – молекула; 4 – корневая система растений

 Fig. 2. Scheme for interaction of structural soil elements:
 I, II, III – strong binding, binding and free water;
 1 – anion; 2 – cation; 3 – molecule;
 4 – plant root system

Газовая и биологическая фазы входят в состав каждого из трех структурных агрегатов в виде кислорода, азота атмосферного воздуха и организмов, микроорганизмов, бактерий, одноклеточных [20, 21].

Минералогический и механический составы почв

Твердая составляющая почвы – это минеральные, органические и органоминеральные структурные элементы. Химический и минералогический составы почв определяются характером материнской породы, на основе которой происходило ее формирование.

Минеральные частицы состоят из окисей (кремния, железа, алюминия), соединений кальция, магния, титана, марганца, калия, натрия, фосфора, серы и микроэлементов (бора, цинка, кобальта, меди и др.), являющихся малой частью общего минералогического состава почв. Органические коллоиды состоят из гуминовой и фолиевой кислот, протеина, клетчатки, смол и других сложных соединений. Основными соединениями являются углерод, водород, кислород, азот, сера, фосфор. Органические коллоиды бывают в соединении с натрием, кальцием, магнием (гуматы оснований), с гидроокислами алюминия, железа и др.

Энергия взаимодействия органических и минеральных коллоидов может быть больше, чем энергия взаимодействия между однородными минеральными коллоидами, что связано с процессом структурообразования. У разнородных энергия взаимодействия очень высокая, если потенциал определяющие ионы у структурных элементов имеют разные знаки (гидроокиси железа и кремниевой кислоты).

Минералы, образующие почвенные структурные агрегаты, разделяются по происхождению на первичные и вторичные. Первичные образовались при остывании магмы, а вторичные – из первичных под воздействием физических, химических и биологических процессов выветривания земной коры. Наиболее распространенные первичные минералы – полевые шпаты, пироксен и амфибол, слюды, кварц. Вторичные – три группы: каолиниты, монтмориллониты и филлиты (гидрослюды).

Важнейшие характеристики почв – механический состав и структура. Механический со-

став характеризует почвы в отношении размеров первичных элементов, прочность которых определяется молекулярным строением горных пород, осколками которых первичные элементы являются. Удельная поверхность дисперсной системы зависит от крупности элементов и определяет ее величину и важнейшие свойства, поэтому механический состав является основным классификационным признаком почв [20, 23].

В почвоведении структура почвы определяется количественно только в отношении содержания структурных агрегатов размерами 0,25–7,00 мм к остальной части почвы [19, 24, 25].

Лиофобные коллоиды значительно влияют на упрочнение структуры почв. Чем лучше агрегатный состав почвы (выше структурность), тем дольше сохраняется ее хорошее сложение, тем меньше оно подвергается влиянию неблагоприятных погодных условий. Роль такой структуры почвы не только в создании хорошего водно-воздушного и теплового режимов в ней, но и в предохранении ее от водной и ветровой эрозии.

В связи со столь большой ролью структуры почвы в земледелии при испытании или исследовании техники необходимо проводить не только механический анализ почвы, но и анализ ее агрегатного состояния [1].

Нагляднее всего агрегатный состав почвы можно отобразить графиком зависимости гранулометрического состава, приведенного на рис. 3 [20].

Для построения функциональной зависимости дисперсности от размера элементов лучше всего использовать полулогарифмическую сетку координат. По оси абсцисс откладываем логарифмы размера фракций (d , мм), а по оси ординат – сумму всех фракций (n , %), менее данного размера.

Выделение фракций диаметром более 0,25 мм осуществляют с помощью сит. Для оценки содержания фракций диаметром менее 0,25 мм применяют метод Стокса (скорость падения фракций в жидкости)

$$v = \frac{2r^2g(\rho_h - \rho_s)}{9\eta},$$

где v – установившаяся скорость частицы, м/с (частица движется вниз, если $\rho_h > \rho_s$, и вверх

в случае $\rho_h < \rho_s$); r – радиус частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_h – плотность частиц, кг/м³; ρ_s – плотность среды, кг/м³; η – динамическая вязкость среды, Па·с.

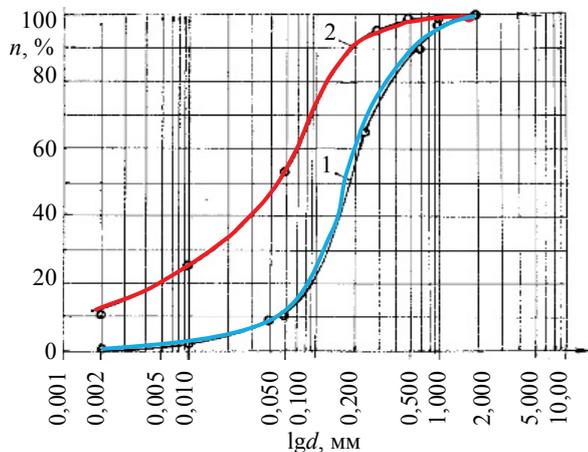


Рис. 3. Зависимость дисперсности от размера фракций:
1 – мелкозернистый песок; 2 – пылеватый суглинок

Fig. 3. Dependence of dispersity on fraction size:
1 – fine sand; 2 – silt loam

Форма почвенных структурных элементов отличается от сферической, поэтому распределение фракций по размерам имеет условный характер.

Равновесное распределение структурных элементов, погруженных в среду с плотностью, меньше плотности самих элементов, определяется зависимостью

$$\left(\frac{kT}{C} - \frac{V_b}{V_c} kT \right) \frac{dC}{dz} - \frac{dU_c}{dz} \frac{V_b}{V_c} - \frac{U_b}{dz} = 0,$$

где kT – температурный коэффициент; C – коэффициент, $C = n_b/n_c$; n_b , n_c – структурные элементы фазы и среды; V_b , V_c – объем, приходящийся на один структурный элемент вещества и на одну молекулу среды; U_b , U_c – потенциальная энергия элементов фазы и среды в гравитационном поле.

Отношение V_c/V_b мало по сравнению с C , поэтому этой величиной можно пренебречь. Например, при объемной концентрации суспензии 10^{-2} моль/л и диаметре структурных элементов 10^{-5} см величина V_c/V_b на два порядка меньше C

$$\frac{kT}{C} \frac{dC}{dz} + \frac{dU_b}{dz} - \frac{dU_c}{dz} \frac{V_b}{V_c} = 0.$$

С учетом гравитационного поля энергия элементов фазы и среды от сил тяжести: $U_b = V_b \rho_b g z$, $U_c = V_c \rho_c g z$.

Следовательно:

$$\frac{dU_b}{dz} = V_b \rho_b g; \quad \frac{dU_c}{dz} = V_c \rho_c g.$$

Тогда

$$\frac{kT}{C} \frac{dC}{dz} + V_b g (\rho_b - \rho_c) = 0.$$

Откуда

$$\ln \frac{C_z}{C_o} = - \frac{V_b g (\rho_b - \rho_c)}{kT} z \quad \text{или} \quad \frac{C_z}{C_o} = e^{-az},$$

где

$$a = \frac{V_b g (\rho_b - \rho_c)}{kT}.$$

Расчеты показывают, что броуновское движение следует учитывать при размере фракций менее 0,005 мкм.

Рабочий процесс обработки почвы основан на принципе работы клина, обеспечивающего деформирование за счет силы тяги F источника энергии. Работа этой силы, согласно уравнению В. П. Горячкина [25], используется на резание в вертикальной и горизонтальной плоскостях, на сжатие, изгиб и перемещение пласта почвы и его вращение (рис. 4).

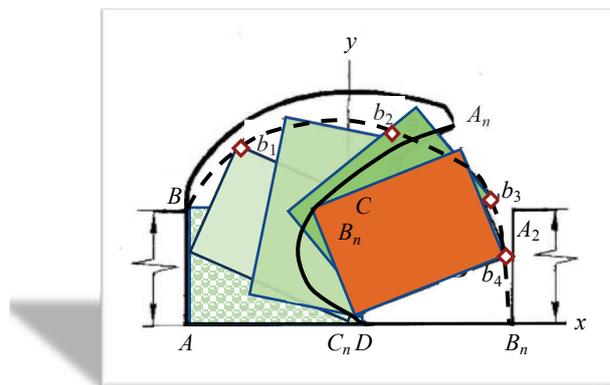


Рис. 4. Схема работы клина (плуга) при обработке почвы:
 $ABCD$ – проекция поперечного сечения пласта;

$Bb_1b_2b_3b_4B_n$ – траектория движения точки B

Fig. 4. Scheme of wedge operation (plough) while cultivating soil: $ABCD$ – projection of stratum cross section; $Bb_1b_2b_3b_4B_n$ – trajectory of point motion B

Из условия устойчивости равновесного состояния сил структурных связей почвы в процессе работы клина можно записать выражение силы

$$F = fG + kab + \varepsilon abv^2,$$

где f – коэффициент трения; G – вес почвообрабатывающего орудия; k – коэффициент изменения параметров сечения; a, b – высота и ширина пласта почвы; ε – коэффициент относительной деформации почвы; v – скорость движения пласта.

Академик В. П. Горячкин предложил метод определения коэффициентов f, k, ε путем замены правой части выведенной им формулы другой математической зависимостью

$$ax + by + cz + l = 0,$$

где $a = 1$; $x = fG$; $b = ab$; $y = k$; $c = abv^2$; $z = \varepsilon$; $l = -F$.

Величина $\Sigma \delta^2 = \Sigma ax + by + cz + l = 0$ должна быть минимальной, то есть:

$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial a} = x \Sigma a a^2 + y \Sigma a b + z \Sigma a c + \Sigma a l = 0;$$

$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial b} = x \Sigma a b + y \Sigma b^2 + z \Sigma b c + \Sigma c l = 0;$$

$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial c} = x \Sigma a c + y \Sigma b c + z \Sigma c^2 + \Sigma c l = 0.$$

Решение трех неизвестных коэффициентов $x = fG, y = k, z = \varepsilon$ при различных значениях $a = 1, b = ab, c = abv^2, l = -F$ предложено Гауссом. Это решение весьма сложно при расчетах и не совсем точное. Дело в том, что физико-механические свойства почвы не могут быть постоянными, и рабочие органы (плуга) и почва испытывают сильно изменяющиеся во времени силы взаимодействия.

Следует учитывать, что полная, накопленная структурными агрегатами энергия от природных сил получает дополнительно часть кинетической энергии деформации рабочего органа почвообрабатывающего орудия. При этом необходимо сравнивать суммарную потенциальную энергию почвы с кинетической энергией орудия. Тогда вместо силы тяги следует применять кинетическую энергию плуга

$$N = \frac{Fv}{75} = \left(\frac{fG}{75} + \frac{k + \varepsilon v^2}{75} ab \right) v = \left[fG + (k + \varepsilon v^2) ab \right] \frac{v}{75},$$

где 75 – мощность, л. с. (сопротивление почвы)

Пористость, вес, влажность и удельная поверхность

Доли единичного объема почвы заняты твердыми структурными элементами, порами, водой с их удельными весами $v_1, \rho_1; v_2, \rho_2; v_3, \rho_3, v_4, \rho_4$ (рис. 5). Биологическая составляющая присутствует в каждой из частей элементарного объема, которую отделить от них невозможно.

Пористость $n = \frac{v_1}{v_1 + v_2}$. Коэффициент пористости $\varepsilon = \frac{v_2}{v_1}$.

Объемный вес абсолютно сухой почвы $\gamma_1 = v_1 \rho_1$.

Объемный вес влажной почвы $\gamma_3 = v_1 \rho_1 + v_3 \rho_3$.

Весовая влажность $W = \frac{v_3 \rho_3}{v_1 \rho_1}$.

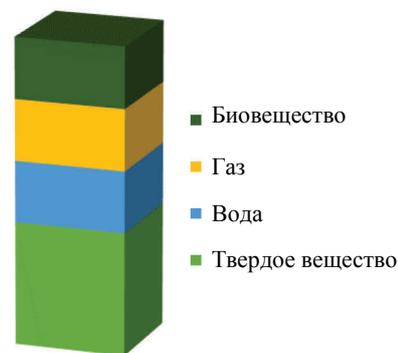


Рис. 5. Составные части дисперсных фаз в элементарном объеме

Fig. 5. Components of disperse phases in elementary volume

Величины $\gamma_3, \gamma_1, \rho_3, \rho_1$ обычно находятся из опытов при проведении исследований. Тогда определим v_1, v_2, v_3 :

$$v_1 = \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad v_2 = 1 - \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad v_3 = \frac{\gamma_3 - \gamma_1}{\rho_3}.$$

Используя полученные зависимости, находим:

$$n = 1 - \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad \varepsilon = \frac{\rho_1}{\gamma_1} - 1; \quad W = \frac{\gamma_3}{\gamma_1} - 1.$$

Некоторые соотношения, связывающие характеристики объема пор, объема твердых элементов, объемного веса влажной почвы, объемного веса сухой почвы, влажности, запишутся в виде:

$$v_2 = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}; \quad v_1 = \frac{1}{1 + \varepsilon}; \quad n = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}.$$

Объемный вес влажной почвы

$$\gamma_3 = \frac{\rho_1}{1 + \varepsilon}(1 + W).$$

Объемный вес сухой почвы

$$\gamma_1 = \frac{\rho_1}{1 + \varepsilon}.$$

Коэффициент насыщения пор водой K_3 – отношение объема пор к полному объему пор

$$K_3 = \frac{v_3}{v_2} = \frac{(\gamma_3 - \gamma_1)\rho_1}{(\rho_1 - \gamma_1)\rho_3}.$$

Получим выражения для пористости и веса многоступенчатых систем, в которых агрегаты каждой ступени состоят из более мелких агрегатов предыдущей ступени. К первой ступени относятся первичные агрегаты, ко второй – микроагрегаты, к третьей – макроагрегаты. Обозначим долю в единичном объеме системы первичных пор (между первичными агрегатами) – V_1 , микропор (между микроагрегатами) – V_2 , макропор (между макроагрегатами) – V_3 .

Обозначим объемы агрегатов ступеней в единице объема системы T_1, T_2, T_3 , состоящей только из этих частиц.

Объемы пор: макро- $V_3 = 1 - T_3$; микро- $V_2 = (1 - T_2)T_3$; первичных $V_1 = (1 - T_1)T_2T_3$.

Первичные поры и микропоры: $V_1 + V_2 = (1 - T_1T_2)T_3$, сумма всех пор: $V_1 + V_2 + V_3 = 1 - T_1T_2T_3$.

Пористость почвы многоступенчатой структуры $n = (1 - T_1T_2 \dots T_n) \cdot 100\%$.

Объемный вес сухой почвы $\gamma_T = (T_1T_2 \dots T_n)dT$.

Влажность почвы с многоступенчатой структурой $W = \frac{V_W}{T_1T_2 \dots T_n} \frac{d_W}{d_T} \cdot 100\%$.

Если проанализировать приведенные данные по этому разделу и сделать предварительные расчеты, то получится, что структурные почвы, состоящие из макроагрегатов, при влажности почвы 33,3 % в трехступенчатой системе сохраняют еще 26,0 % пространства, свободного от твердых элементов и воды. Такая почва не нуждается в механической обработке, в случае если не нужно вести борьбу с сорной растительностью.

Важнейшей характеристикой любой дисперсной системы (почвы) является ее удельная поверхность, т. е. суммарная поверхность структурных элементов в единице объема пористого тела.

Удельная поверхность системы из однородных элементов определенного объема может быть выражена зависимостью

$$\Omega = \frac{b}{d},$$

где b – коэффициент формы элементов и характера взятого объема; d – какой-либо из характерных размеров структурных элементов.

В элементах, близких по форме к сферическим, $b = 3-4$, для ячеистой поверхности $b = 3 + n$, где n – отношение диаметра ячейки к ее глубине.

Для песков при диаметре структурного элемента 0,5 мм удельная поверхность $\Omega \approx 10^2 \text{ см}^{-1}$. Для глин при размере ячеек 1 мкм и отношении $n \approx 7$ удельная поверхность $\Omega \approx 10^5 \text{ см}^{-1}$, т. е. в тысячу раз больше, чем у песка. Для реальных глин удельная поверхность превышает в 10 и более раз вычисленные по формуле выше значений Ω и достигает более 100 м² на 1 см³ объема почвы. Из этого следует, что чем больше удельная поверхность структурных элементов, тем важнее роль поверхностных сил.

Механизм уплотнения структурных агрегатов почвы

Если в сплошных средах деформации сдвига определяются законами упругости, пластичности или вязкого течения, то в дисперсных телах к указанным деформациям добавляются деформации контактного взаимодействия.

В процессе сдвиговых деформаций отдельные структурные элементы и их группы (агрегаты) могут совершать поступательное и вращательное движение. Прочность дисперсных систем и их механические характеристики определяются проявлением поверхностных сил, зависящих от величины удельной поверхности и плотности системы, от природы и формы элементов.

Деформация структурной почвы (рис. 6) может возникнуть от сдвиговых усилий видов:

- натяжение поверхности структурного элемента превосходит возникающие в нем напряжения при сдвигающих усилиях в системе;
- вращение относительно центра тяжести элемента;
- относительное смещение элементов без первых двух деформаций.

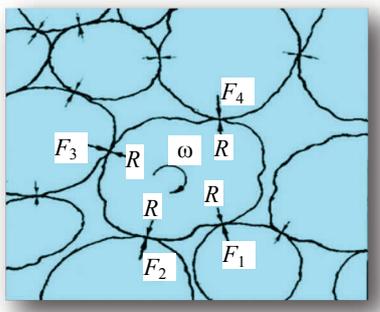


Рис. 6. Процесс сдвиговых деформаций структурных элементов

Fig. 6. Process of shearing deformations in structural elements

Деформации первого вида присущи песчаным почвам и гравийным грунтам. В этих случаях происходит вращение структурного элемента относительно какого-либо контакта с соседними элементами, и условие его устойчивости определяется следующим образом:

$$F_i a - N_i b - \Sigma(C_c + C_k)e = 0,$$

где F_i – проекция равнодействующей внешних сил по отношению к элементу на направление, совпадающее с направлением сдвига системы; N_i – проекция равнодействующей внешних сил на направление, перпендикулярное к направлению сдвига; C_c – сила сцепления с соседними элементами при возникновении сдвигающих напряжений; C_k – кинетическое сопротивление водных прослоек в точках контакта; a , b , e – длина плеч приложения силы относительно точки контакта.

Из приведенной зависимости общее сопротивление элемента сдвигу F_1 находится по формуле

$$F_1 = F_i = [N_i b + \Sigma(C_c + C_k)]e/a.$$

Если приложение нормальных N и сдвигающих F сил происходит одновременно и в период сдвига плотность системы в местах контактов не успевает измениться, то последнее выражение можно записать в виде

$$F_1 = f_1 N + C_1,$$

где f_1 – коэффициент трения, $f_1 = b/a$; C_1 – сцепление при сдвиге, $C_1 = \Sigma(C_c + C_k)e/a$.

В деформации второго вида, где возможно вращение структурного элемента, сопротивление сдвигу F_2 определяется зависимостью первого вида, но длина плеча берется относительно мгновенного центра вращения.

В третьем случае характер упаковки агрегатов и значение сил, препятствующих вращению, могут оказаться менее вероятными, чем относительный сдвиг групп элементов без вращения. Для такого случая статическое сопротивление сдвигу F_3 , приходящееся на один контакт, определится из выражения

$$F_3 = (q + q_{kr} + q_p + q_c + q_\tau) \operatorname{tg} \varphi + (q' + q'_{kr} + q'_p + q'_c + q'_\tau),$$

где q – внешняя нагрузка; q_{kr} – молекулярная прочность всех контактов на разрыв; q_p – молекулярная и ионно-электростатическая силы между элементами; q_c – капиллярная сила, действующая в контактах; q_τ – сила пластического прилипания; φ – угол внутреннего трения в почве.

Все силы q дают проекции сил q' на нормаль к направлению сдвига. Для кинетического сопротивления сдвигу учитывают вязкопластическое сопротивление водных прослоек при относительном смещении групп структурных элементов.

Возможен и четвертый случай, когда происходит срез в плоскости, проходящей через внутренний состав дисперсной системы, требующий меньшей затраты энергии, чем при деформации в рассмотренных трех видах [20].

В зависимости от прочности структурных элементов и интенсивности внешних воздействий деформации могут происходить с разрушением или без разрушения этих структур. Однако в целом любой объем структурного тела находится в устойчивом равновесном состоянии в соответствии с законом термодинамики.

Если имеются некоторые однородные системы, например газовая и жидкая, образующие собой туманы, то их состояние может быть определено заданием каких-либо двух термодинамических величин, например объема V и внутренней энергии U . Но не всем значениям величин V и U (с физической точки зрения) соответствуют возможные состояния. Известно, что во всяком однородном состоянии должны выполняться термодинамические неравенства $C_V > 0$, $(\partial C_V / \partial C_P)_T < 0$, где C_V – теплоемкость при постоянном объеме V ; C_P – теплоемкость при постоянном давлении P ; T – температура вещества. В реальности имеются такие значения величин V и U , при которых эти условия не выполняются. В этом случае среда перестает быть однородной и распадается на две соприкасающиеся однородные части, находящиеся в разных состояниях.

Состояния вещества, которые могут одновременно существовать в равновесии друг с другом (причем они соприкасаются между собой), называются различными фазами вещества. Примером такого равновесия может служить «точка росы» – дисперсионная среда, в которой можно видеть существование одновременно трех фаз дисперсионной системы: твердое тело (лед), жидкость (вода), газ (атмосферный воздух).

Условием равновесного состояния трех фаз является равенство в окрестности этой точки температур $T_1 = T_2 = T_3$. Другое условие равновесия – равенство давлений во всех трех фазах ($P_1 = P_2 = P_3$), поскольку на поверхности трех фаз силы, с которыми они действуют друг на друга, должны быть равны и противоположны. Третье – должно выполняться условие равенства химических потенциалов $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$.

Силовое контактное взаимодействие структурных тел

В настоящее время определение прочности почвенных агрегатов и почвы в целом проверяется путем экспериментального исследования с доведением или без доведения до разрушения. Для этого задаются запасом прочности k ,

откуда $1/k$ часть есть величина допустимой нагрузки. На рис. 4 показан прием деформирования, в котором этот процесс состоит из сжатия и изгиба (оба – в трех плоскостях: горизонтальной, вертикальной, профильной), кручения относительно центра тяжести поперечного сечения пласта на 180° , при этом пласт может разрушиться или остаться относительно не разрушенным. Соответственно пласт обладает определенной прочностью, которая оценивается его физико-механической прочностью.

Прочность почвы как физического структурного тела определяется опытным путем, поскольку теоретических расчетов прочности таких тел не имеется. Это понятие существует в стадии «опасное (предельное) состояние». Оно характеризуется наступлением текучести, сопровождающейся остаточными деформациями или появлением трещин, свидетельствующих о начале разрушения.

Принято, что тело (или элемент инженерной конструкции) находится в опасном состоянии, когда такое состояние появляется в любой его точке. Точку тела, в окрестности которой какая-нибудь дисперсионная среда или материал элемента конструкции первым оказывается в опасном состоянии, считают опасной точкой. Здесь следует отметить, что нагрузка должна пропорционально увеличиваться при одновременном возрастании всех других сил, действующих на пласт почвы (инженерную конструкцию), причем так, что соотношение между силами сохраняется неизменным с течением времени.

В общем случае при воздействии на пласт почвы определить опасную точку можно лишь после выбора критерия опасного состояния. Если причиной опасного состояния считать сжимающие напряжения, то опасной является та точка дисперсионной среды, в которой возникает самое большое сжимающее напряжение. Если причиной опасного состояния считать касательные напряжения, то опасной будет кочка, в которой возникает самое большое касательное напряжение.

На рис. 4 показано взаимодействие двух твердых физических тел (почвы и рабочего органа), которое является временным контактным, причем каждое тело обладает разными механическими характеристиками прочности. Первое тело (почва) – дисперсионная среда, включающая в себя все четыре дисперсные

системы (рис. 1), второе (металл) – включает только одну дисперсную фазу (твердую).

Вопросы теории упругой прочности структурных тел (агрегатов) правильной геометрической формы подробно изложены в технической литературе. Основные теории – классические:

- выдвинута Галилеем: фактором разрушения материала являются наибольшие нормальные напряжения растяжения или сжатия;

- на основе закона Гука – выдвинута Мариоттом: прочность материала в исследуемой точке будет нарушена, если наибольшее относительное удлинение (уменьшение) в ней достигнет той же величины ϵ_0 , что и предел прочности всего образца при растяжении или сжатии;

- предложена Кулоном: предел прочного сопротивления в сложном напряженном состоянии будет достигнут тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигнет величины ($\tau_0 = \sigma_0/2$) предела прочности образца на растяжение или сжатие;

- выведена Мором: сопротивление сдвигам в агрегате зависит не только от касательных, но и нормальных напряжений в данной точке тела; сопротивление разрушению от касательных напряжений выше в тех частях агрегата, где преобладают сжимающие нормальные напряжения, и ниже там, где преобладает растяжение (в теории прочности Мора учитывается, что касательным напряжениям сопротивляются слипание структурных элементов агрегата и трение, возникающее при появлении первых сдвигов – линий Чернова, как признаков разрушения);

- на основании теоремы Кастильяно и методики Бетти: опасное состояние материала наступает, когда удельная потенциальная энергия изменения формы достигает опасного значения (достоинством теории является то, что она учитывает все три главных напряжения и объясняет высокую прочность материала при всестороннем равномерном сжатии).

Силовое взаимодействие агрегатов происходит силами гравитационного и теплового полей, сопровождаемое упругими и пластическими деформациями. При этом контактирующие агрегаты могут иметь произвольную конфигурацию и размеры (рис. 7).

Силовое взаимодействие в точке F_4 контакта вызывает деформацию агрегатов, приводящую к сближению их центров тяжести, которая

сопровождается деформацией сдвига и относительного перемещения, приводящего к уплотнению агрегатов и повышению свободной потенциальной энергии сопротивления U .

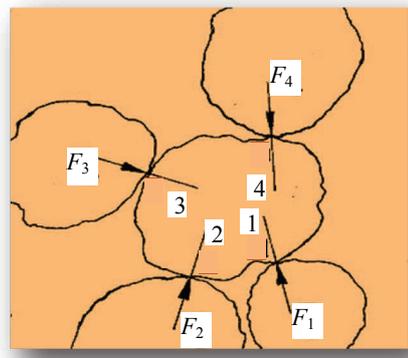


Рис. 7. Схема определения сил контактного взаимодействия

Fig. 7. Scheme for determination of contact interaction forces

Для определения U необходимо найти величину перемещения. Для этого можно воспользоваться теоремой Кастильяно, которая описывает взаимодействие в почвообразовательном процессе структурных агрегатов, испытывающих всестороннее сжатие. Согласно этой теореме, агрегат, зажатый силами гравитации между четырьмя аналогичными агрегатами, лишен возможности перемещения. Он может испытывать два различных состояния упругой системы. Допустим, что в первом состоянии к агрегату приложены силы F_1 и F_2 , а во втором – F_3 и F_4 .

Примем, что перемещения точек этих сил по направлениям их действия равны $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ в первом состоянии и $\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3, \delta'_4$ – во втором.

Теорема взаимности перемещений: *работа, совершенная силами первого состояния, равна работе, совершенной силами второго состояния на соответствующих перемещениях первого состояния, выразится в виде уравнения*

$$F_1\delta'_1 + F_2\delta'_2 = F_3\delta_3 + F_4\delta_4. \quad (1)$$

Для проверки этой зависимости рассмотрим энергию деформации агрегата, когда силы F_1, F_2, F_3, F_4 действуют все вместе, и используем то, что количество потенциальной энергии U деформации структурного агрегата не зависит от порядка, в котором приложены силы, а зависит только от конечных значений сил.

Примем порядок приложения сил: в первом – F_1 и F_2 , во втором – F_3 и F_4 . Тогда потен-

циальная энергия деформации, накопленная агрегатом при приложении сил F_1 и F_2 , запишется

$$F_1\delta_1/2 + F_2\delta_2/2. \quad (2)$$

Приложив силы F_3 и F_4 , определим работу, совершенную этими силами:

$$F_3\delta'_3/2 + F_4\delta'_4/2. \quad (3)$$

При этом следует учитывать, что в случае приложения F_3 и F_4 точки приложения ранее действующих сил F_1 и F_2 переместятся на δ'_1 и δ'_2 . Тогда F_1 и F_2 совершат работу

$$F_1\delta'_1 + F_2\delta'_2. \quad (4)$$

В (4) потенциальная энергия не учитывает 1/2 ее величины, так как силы F_1 и F_2 остаются постоянными все время, когда точки их приложения перемещаются на δ'_1 и δ'_2 .

Поэтому полная потенциальная энергия U деформации, накопленная структурным агрегатом, равна сумме (2), (3), (4)

$$U = F_1\delta_1/2 + F_2\delta_2/2 + F_3\delta'_3/2 + F_4\delta'_4/2 + F_1\delta'_1 + F_2\delta'_2. \quad (5)$$

При втором способе нагружения сначала приложим силы F_3 и F_4 , а затем F_1 и F_2 . После этого, рассуждая как ранее, получим

$$U = F_3\delta'_3/2 + F_4\delta'_4/2 + F_1\delta_1/2 + F_2\delta_2/2 + F_3\delta_3 + F_4\delta_4. \quad (6)$$

Приравняв (5) и (6), получим уравнение (1).

Теорема о взаимности перемещений применима для любого числа сил, а также для пар сил или для сил и пар сил. В случае приложения пары сил (момента) за перемещение принимается соответствующий угол поворота.

Когда действует только одна сила F_1 в первом состоянии напряжений и только одна сила F_2 во втором состоянии, уравнение (1) запишется как $F_1\delta'_1 = F_2\delta'_2$. Впервые это было доказано Максвеллом, и теорема названа его именем.

Если примем, что величины сил F_1 и F_2 численно равны между собой (но знак равенства ставить нельзя, так как эти силы являются обобщенными и могут быть разнородными (силы, моменты, их совокупности)), то (1) перейдет в более простое равенство

$$1 \cdot \delta'_1 = 1 \cdot \delta'_2. \quad (7)$$

Эта теорема – о взаимности перемещений, которая совместно с теоремой Бетти о взаимности работ должна использоваться в расчетах прочности при контактном взаимодействии разнородных структурных физических деформируемых тел (полидисперсной почвы и монодисперсного рабочего органа).

Например, при действии одной нормальной силы $N = 1$ (при этом $M = 0$) перемещение можно выразить зависимостью $\delta(d\varphi) = \frac{1}{EA r} d\varphi$; при действии одного момента $M = 1$ ($N = 0$) – $\delta(ds) = \frac{1}{EA r} ds$, где $\delta(d\varphi)$, $\delta(ds)$ – величина элементарного изменения угла изгиба агрегата и длины агрегата; E – модуль упругости; A – площадь поперечного сечения; r – полярный радиус.

Отсюда следует, что $\delta(d\varphi) = \delta(ds)$ – и это частный случай теоремы о взаимности перемещений.

На основании приведенного исследования можно сделать вывод, что (7) можно представить в следующем виде:

$$1 \cdot \delta_{mn} = 1 \cdot \delta_{nm} \quad \text{или} \quad 1 \cdot \delta'_m = 1 \cdot \delta_n. \quad (8)$$

На рис. 4 показан процесс деформирования пласта, вырезаемого из массива почвы, как физического твердого тела в динамике (движении). В результате этого процесса пласт испытывает состояния деформирования: резание в двух плоскостях, сжатие в продольной оси пласта, изгиб в горизонтальном и вертикальном направлениях, кручение относительно продольной осевой линии. При этих видах деформаций пласт поворачивается на 180° и не разрушается, т. е. почва пласта обладает механическими свойствами прочности и пластичности. Отсюда теорема о взаимности перемещений в обозначениях (7) запишется для общего случая действия сил (N , Q) и момента (M):

$$1 \cdot \delta_{12} = 1 \cdot \delta_{21}; \quad 1 \cdot \delta_{13} = 1 \cdot \delta_{31}; \quad 1 \cdot \delta_{23} = 1 \cdot \delta_{32}.$$

Первое из этих равенств показывает, что вертикальный прогиб в точке C под действием пары сил $F_2 = 1$ равен углу поворота δ_{21} под действием вертикальной силы $F_1 = 1$ (рис. 8).

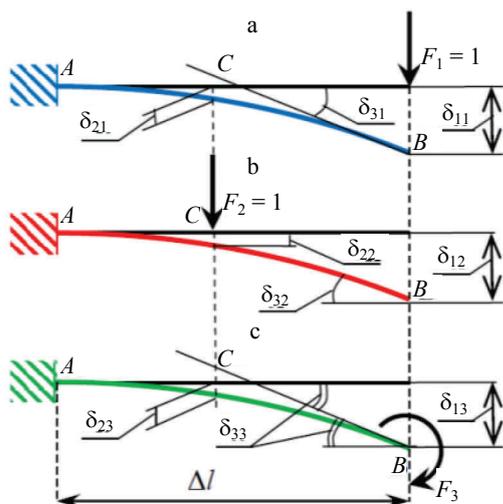


Рис. 8. Схема обозначений на примере консоли, нагруженной силой $F_1 = 1$

Fig. 8. Schematic legend diagram as exemplified by cantilever construction loaded by force $F_1 = 1$

Поясним эти обозначения на примере консоли, нагруженной силой $F_1 = 1$ на конце балки (рис. 8а). Обозначив прогиб конца консоли f_B , угол наклона касательной линии к упругой в этой точке φ_B , прогиб v_C в точке C по принятой системе, получим два единичных состояния с указанными на них единичными силами: $f_B = \delta_{11}$; $\varphi_B = \delta_{31}$; $v_C = \delta_{21}$. Во втором состоянии под действием силы $F_2 = 1$ (рис. 8b) те же величины будут равны: $f_B = \delta_{12}$; $\varphi_B = \delta_{32}$; $v_C = \delta_{22}$.

По аналогии с этим введем обозначение для перемещения системы, находящейся под произвольной нагрузкой (назовем ее F), в которую входят какие угодно обобщенные силы. Вводим фиктивное состояние, в котором действует единичная сила $F'_k = 1$ в точке k . Через $\Delta_{k(F)}$ обозначим перемещение точки k системы, соответствующее силе $F'_k = 1$, вызванное силой F .

В общем случае будем иметь

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \int \left(\frac{MM'}{EI} + \frac{NN'}{EA} + \frac{QQ'}{GAa} \right) ds. \quad (9)$$

В случае шарнирной фермы, образованной из прямых стержней:

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \sum \frac{N_i N'_i}{E_i A_i} l_i. \quad (10)$$

В случае одного стержня

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \int \left(\frac{MM'}{EI} + \frac{NN'}{EA} + \frac{QQ'}{GAa} \right) ds. \quad (11)$$

Формулы (9)–(11), полученные Мором, применяются и к таким структурам, как почва и грунты. Это общие формулы механики материалов и для определения упругих перемещений плоских стержневых систем. Если рассматривать пласт как твердое физическое тело, то он представляет консольный брус (балку). Поэтому к нему применимы схемы прочностных расчетов, которые существуют для расчета консольной балки.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод исследования упругости (прочности, жесткости, устойчивости смятию) природных тел, представляющих собой полидисперсные системы, который может быть использован для расчета надежности и экономичности разрабатываемых инженерных конструкций, применяемых при обработке почвы.

2. Проведен анализ возникновения сил сопротивления внешним нагрузкам в полидисперсных природных деформируемых средах, в частности в почве. Предложены приемы обработки почвы, позволяющие выполнить рыхление (деформацию) и защиту географической (ландшафтной) оболочки Земли.

3. Анализ проведен на основании исследования производственных опытов на почвах Нечерноземной зоны СССР [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Механизация защиты почв от водной эрозии в Нечерноземной полосе / А. Т. Вагин [и др.]; под ред. А. Т. Вагина. Л.: Колос, 1977. 272 с.
2. Severnev, M. M. Improvement of Machinery for Chemical Fertilizer Application with the Aim of Achieving a More Even Spread Over Agricultural Land / M. M. Severnev, L. V. Larchenkov. AGRI/MECH Report – Economic Commission for Europe (USA). 1984. 103.
3. Развитие наук о Земле в СССР. М.: Наука, 1967. 714 с.
4. Панников, В. Д. О развитии исследований по почвозащитному земледелию / В. Д. Панников // Вестник сельскохозяйственной науки. 1970. № 2. С. 29–39.
5. Калесник, С. В. Общие географические закономерности Земли / С. В. Калесник. М.: Мысль, 1970. 284 с.
6. Введение в физическую географию / К. К. Марков [и др.]. М.: Мысль, 1978. 192 с.
7. Уиппл, Ф. Земля, Луна и планеты / Ф. Уиппл; пер. с англ. 2-е изд. М.: Наука, 1967. 252 с.
8. Докучаев, В. В. Учение о зонах природы и классификация почв / В. В. Докучаев. М.; Л.: Селхозгиз, 1951. Т. 6. 296 с.

9. Расчетная модель процесса эрозийного разрушения композиционного материала / Ю. В. Полежаев [и др.] // ИФЖ. 1979. Т. 37, № 3. С. 395–404.
10. Кулаковская, Т. Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т. Н. Кулаковская. М.: Агропромиздат, 1990. 220 с.
11. Нерпин, С. В. Физика почв / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. М.: Наука, 1967. 564 с.
12. Механика грунтов / Б. И. Далматов [и др.]. М.; СПб.: АСВ, 2000. Ч. 1: Основы геотехники в строительстве. С. 42–68.
13. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С. Б. Ухов. М.: Высш. шк., 2007. 566 с.
14. Цитович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цитович. М.: Высш. шк., 1983. С. 26–66.
15. Гедройц, К. К. Учение о поглотительной способности почв / К. К. Гедройц. М.: Сельхозгиз, 1933. 206 с.
16. Мишустин, Е. Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия / Е. Н. Мишустин. М.: Наука, 1972. 344 с.
17. Тимирязев, К. А. Избр. соч. / К. А. Тимирязев. М.: Госиздат с.-х. лит., 1948. Т. 2: Земледелие и физиология растений. 424 с.
18. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика пористых и волокнистых дисперсных структур / П. А. Ребиндер, И. Н. Влодавец // Проблемы физико-механики волокнистых и пористых дисперсных структур и материалов: сб. статей. Рига, 1967. С. 5–40.
19. Вернадский, В. И. Живое вещество и биосфера / В. И. Вернадский. М.: Наука, 1994. 672 с.
20. Тюрин, И. В. Органическое вещество и его роль в почвообразовании и плодородии: учение о почвенном гумусе / И. В. Тюрин. М.; Л.: Сельхозгиз, 1937. 286 с.
21. Качинский, Н. А. Физика почвы / Н. А. Качинский. М.: Высш. шк., 1965. 324 с.
22. Жданович, Г. М. Механика порошковых материалов / Г. М. Жданович. Минск: Изд-во БНТУ, 2013. 420 с.
23. Эрозия / под ред. К. Прис; пер. с англ. под ред. Ю. В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 с.
24. Ландау, Л. Д. Статическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1976. 584 с.
25. Горячкин, В. П. Сборник сочинений / В. П. Горячкин, под ред. В. П. Горячкина. М.: Колос, 1968. Т. 2. 456 с.
26. Духов, С. С. Электрофорез / С. С. Духов, Б. В. Дерягин. М.: Наука, 1976. 332 с.
- Nauki* [Bulletin of Agricultural Science], (2), 29–39 (in Russian).
5. Kalesnik S. V. (1970) *General Geographical Regularities of Earth*. Moscow, Mysl Publ. 284 (in Russian).
6. Markov K. K., Suetova I. A., Dobrodeev O. P., Simonov Yu. G. (1978) *Introduction to Physical Geography*. Moscow, Mysl Publ. 192 (in Russian).
7. Whipple F. (1946) *Earth, Moon and Planets*. Philadelphia, The Blakiston Company. 293.
8. Dokuchayev V. V. (1951) *Doctrine on Nature Zones and Soil Classification. Vol. 6*. Moscow; Leningrad, Publishing House "Selkhozgiz". 296 (in Russian).
9. Polezhaev Yu. V., Romanchenkov V. P., Chirkov I. V., Shebeko V. N. (1979) A model for Calculating the Erosion of a Composite Material. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 37 (3), 395–404.
10. Kulakovskaya T. N. (1990) *Optimization of Agro-Chemical System of Soil Plant Nutrition*. Moscow, Agropromizdat Publ. 220 (in Russian).
11. Nerpin S. V., Chudnovsky A. F. (1967) *Soil Physics*. Moscow, Nauka Publ. 564 (in Russian).
12. Dalmatov B. I., Bronin V. N., Karlov V. D., Manguшев R. A. (2000) *Soil Mechanics. Vol. 1: Fundamentals of Geotechnics in Construction*. Moscow; Saint-Petersburg, Publishing House "ASV", 42–68 (in Russian).
13. Ukhov S. B. (2007) *Mechanics of Soils, Foundation Engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola. 566 (in Russian).
14. Tsitovich N. A. (1983) *Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 26–66 (in Russian).
15. Gedroyts K. K. (1933) *Doctrine on Soil Absorption Capacity*. Moscow, Selkhozgiz Publ. 206 (in Russian).
16. Mishustin E. N. (1972) *Micro-Organisms and Land Productivity*. Moscow, Nauka Publ. 344 (in Russian).
17. Timiryazev K. A. (1948). *Selected works. Vol. 2. Agriculture and Physiology of Plants*. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature. 424 (in Russian).
18. Rebinder P. A., Vlodavets I. N. (1967) Physical and Chemical Mechanics of Porous and fibrous Dispersive Structures. *Problemy Fiziko-Mekhaniki Voloknistykh i Poristykh Dispersnykh Struktur, i Materialov: sb. st.* [Problems of Physical Mechanics in Fibrous and Porous Dispersive Structures and Materials: Selected Papers]. Riga, 5–40 (in Russian).
19. Vernadsky V. I. (1994) *Living Matter and Biosphere*. Moscow, Nauka Publ. 672 (in Russian).
20. Tiourin I. V. (1937) *Organic Substance and its Role in Soil Formation and Fertility. Doctrine on Soil Humus*. Moscow; Leningrad, Selkhozgiz Publ. 286 (in Russian).
21. Kachinsky N. A. (1965) *Soil Physics*. Moscow, Vysshaya Shkola. 324 (in Russian).
22. Zhdanovich G. M. (2013) *Mechanics of Powder Materials*. Minsk, Belarusian National Technical University. 420 (in Russian).
23. Price K. (1982) *Erosion*. Moscow, Mir Publ. 464 (in Russian).
24. Landau L. D. Lifshits E. M. (1976) *Static Physics*. Moscow, Nauka Publ. 584 (in Russian).
25. Goryachkin V. P. (1968) *Collected Works. Vol 2*. Moscow, Kolos Publ. 456 (in Russian).
26. Dukhov S. S., Deryagin B. V. (1976) *Electrophoresis*. Moscow, Nauka Publ. 332 (in Russian).

Поступила 21.04.2017

Подписана в печать 04.07.2017

Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Vagin A. T., Kostyukov P. P., Larchenkov L. V., Piletskii A. Z., Pugach I. A. (1977) *Mechanization of Soil Protection Against Water Erosion in Nonchernozem Belt*. Leningrad, Kolos Publ. 272 (in Russian).
- Severnev M. M., Larchenkov L. V. (1984) Improvement of Machinery for Chemical Fertilizer Application with the Aim of Achieving a More Even Spread Over Agricultural Land. *AGRI/MECH Report – Economic Commission for Europe (USA)*, (103).
- Vinogradov A. (ed.) (1967) *Development of Earth Sciences in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 714 (in Russian).
- Pannikov V. D. (1970) On Development of Investigations on Conservation Farming. *Vestnik Selskokhozyaistvennoy*

Received: 21.04.2017

Accepted: 04.07.2017

Published online: 29.01.2018