

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО ТЕЛА

DEFORMATION MECHANISM OF COMPRESSION STRUCTURAL BODY

Oleg N. Protasenya

Leonid V. Larchenkov

Marina L. Protasenya

Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny

220127 Mińsk, Białoruś

al. Niezależności 65

Andrzej Jakubowski

Akademia Morska w Szczecinie

Zakład Mechaniki Technicznej

Wały Chrobrego 1-2

70-500 Szczecin

e-mail: a.jakubowski@am.szczecin.pl

Abstract: Application of agricultural technique for preparation (loosening) of soil to sowing of agricultural cultures has an ambivalent character: from one side, elimination of weeds, and from the other mechanical destruction by the eyelids of the folded structure of soil profiles. The questions of compression of structure of soil are considered in the process of her forming and influence of the external loading without substantial violation of the structure.

Keywords: deformation mechanism, structure of bodies, dispersible system, dispersible environment, structure of soil, free energy, specific surface, dispersion.

Введение

Существует множество физических тел, состоящих из большого количества отдельных более или менее однородных твёрдых частиц (структурных элементов), связанных между собой силами притяжения и сцепления. Эти тела, называемые вязкопластическими или структурными материалами, по своим физико-механическим свойствам занимают промежуточное положение между металлом и жидкостью. К ним относится почва, объединяющая гидросферу, верхнюю часть земной коры и нижнюю часть атмосферы планеты Земля. Поверхность почвы покрыта растительностью, которая защищает её от разрушения (эрозии) стихийными силами природы — ливнями и сильными ветрами. Почва является местом зарождения жизни, которой способствовали определённые физические и химические условия, необходимые для синтеза сложных органических молекул, а также является питательной средой для растений, живых организмов и микроорганизмов, которые участвуют в почвообразовательном процессе. Способность почвы быть питательной средой для растений называют плодородием.

Плодородие используется для производства продуктов питания растительного происхождения для человека и животных. Для этого производства требуется специальная (культурная) растительность, не способная для защиты почвы от эрозии. Подготовка почвы к посеву заключается в уничтожении естественной растительности и обработке почвы для создания необходимой структуры. В естественном почвообразовательном процессе происходит формирование структуры, которую приходится разрушать из-за того, что необходимо уничтожить естественную растительность как сильного конкурента окультуренным растениям. Такая обработка производится плугом отделением от массива пласта с оборотом его на 180°. Перевернутая почва оказывается открытой для стихийных сил природы. Для ее сохранения требуется специальная противо-эрозионная техника и технология [1÷9].

Структура почвы

Необходимо знать физико-механические свойства почвы, представляющей собой многокомпонентную полидисперсную систему, которую можно изобразить в виде матрицы (табл. 1).

Таблица 1. Дисперсные системы по агрегатному состоянию почвы.

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза			
	газовая	жидкая	твёрдая	биомасса
газовая	Дисперсная система не образуется	Туманы	Дымы, пыль	Растения, животные, насекомые
жидкая	Пены	Эмульсии	Суспензии	Растения, бактерии
		Золи (коллоиды)		
твёрдая	Аэрогели	Жидкие включения в твёрдых телах	Твёрдые золи (рубиновое стекло)	Корни, мхи, сине-зелёные водоросли
биомасса	Растения, животные, насекомые	Одноклеточные, растения, бактерии	Корни, мхи, сине-зелёные водоросли	Дисперсная система не образуется

Дисперсная система — образование из двух или большего числа фаз (элементов) с сильно выраженными поверхностями раздела между ними. В дисперсной системе одна из фаз (*дисперсная*) распределена в виде мелких структурных элементов (кристалликов, нитей, плёнок или пластинок, капель, пузырьков) в сплошной *дисперсионной среде*. Дисперсные системы по основной характеристике — размерам элементов (*дисперсности*) — делятся на низкодисперсные и высокодисперсные (*коллоидные системы* или *коллоиды*).

Дисперсионная среда объединяет в себе четыре дисперсные фазы: газовую, жидкую, твёрдую и биологическую. Каждая среда представляет собой структурные элементы, которые, слипаясь, образуют более крупные структуры (агрегаты).

Укрупнению структурных элементов (увеличению устойчивости от размокания), способствуют органо-минеральные вещества, а поглощению жидкости и накоплению её в почве способствует образование пустот в связи с увеличением размеров элементов. Структурные элементы почвы, имеющие электрические заряды, находящиеся под воздействием внешних магнитных, электрических, гравитационных и тепловых полей, совершают постоянные перемещения и столкновения друг с другом, что приводит к деформированию структурных агрегатов.

Структурные элементы тел различных материалов могут быть однородными или разнородными, различающиеся размером и формой, иметь гладкую, шероховатую или угловатую оболочку. Оболочка структурного элемента воспринимает контактную нагрузку, давление от которой из-за малой площади контактной поверхности достигает такой величины, при которой возникают пластические деформации. По данным [10, 11] при среднем напряжении в массиве песка 1 кг/см² наибольшее контактное давление равно около 20 000 кг/см². При таком давлении первоначально точечный контакт переходит в контакт по малой поверхности конечной величины, и оболочка пластически деформируется или разрушается.

Деформация почвы происходит под воздействием следующих факторов: в процессе формирования — электрической, магнитной, гравитационной энергии

полей и физико-химических процессов; в процессе обработки — разрушения сформированной структуры. С точки зрения формирования структуры следует рассмотреть деформационный механизм взаимодействия структурных элементов при уплотнении и прочность образующихся более крупных структурных агрегатов.

Основными структурными элементами почвы являются твёрдые частицы, жидкости, газ (воздух), живые нано- и макро- организмы (рис. 1). Главная роль в структурообразовании и обеспечении прочности структурных агрегатов принадлежит твёрдым элементам, которые представлены минералами: фосфором, азотом, калием. Но не менее важны также жидкость (*I* – вода прочно связанная; *II* – вода связанная; *III* – вода свободная), газ (почвенный воздух) и биомасса (корни растений и живые организмы).

В структурных агрегатах наряду с валентными связями, возникающими при расстояниях между атомами (молекулами) около нескольких ангстрем, существуют молекулярные силы взаимодействия: при малых расстояниях — силы отталкивания; при больших расстояниях — силы притяжения, монотонно убывающие при отдалении молекул. Наличие сил между двумя атомами создаёт аналогичные силы взаимодействия между двумя структурными элементами. На основании теорий, разработанных учёными П.С. Лапласом, Л.-М.-А. Навье, Д.И. Менделеевым, М.П. Авенариусом, Ш.Ю. Кулоном, А.М. Ампером, Ван-дер-Ваальсом, П.Н. Лебедевым, С.В. Нерпиным, получена зависимость энергии взаимодействия между двумя молекулами:

$$U = -\frac{1}{r^6} \left(\frac{2}{3} \frac{d_1^2 d_2^2}{kT} + d_1^2 a_2 + d_2^2 a_1 + \frac{3h}{2} a_1 a_2 \frac{v_1 v_2}{(v_1 + v_2)} \right) \quad (1)$$

где:

- d* — дипольный момент молекул;
- r* — расстояние между молекулами;
- a* — поляризуемость молекул;
- v* — собственные главные частоты молекул;
- h* — постоянная Планка;
- kT* — градиент температуры.

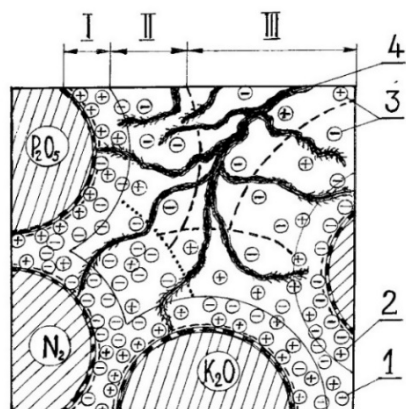


Рис. 1. Схема взаимодействия структурных элементов почвы: I – вода прочно связанная; II – вода связанная; III – вода свободная; 1 – анион, 2 – катион, 3 – молекула, 4 – корневая система растений.

Если обозначить сумму членов формулы (1) через S , то для общей величины энергии взаимодействия полярных молекул получим выражение для двух молекул [12÷15]:

$$U = -\frac{S}{r^6} \quad (2)$$

Сила взаимного притяжения между молекулами будет равна:

$$f = -\frac{SU}{dr} = \frac{6S}{r^7} \quad (3)$$

Константа S всегда постоянна для данного типа атомов. Для многих простых молекул можно пользоваться приближённой формулой:

$$S \approx 3hv_0 \frac{a^2}{4} \quad (4)$$

где:

hv_0 — характеристический термин энергии, который оценивается из экспериментально установленной формулы для оптической дисперсии газа;

a — поляризуемость молекулы.

Расчёт справедлив для расстояний r , больших, чем длины волн поглощения. В результате энергия оказывается обратно пропорциональной не шестой, а седьмой степени расстояния. Соответственно, сила обратно пропорциональна восьмой степени.

Деформационный механизм уплотнения структурных элементов почвы

Формирование почв находится под воздействием внешней энергии полей различной природы, в результате чего структурные макроагрегаты деформируются (возникают напряжения и перемещения). Деформация проявляется в виде трёх компонент: упругой, пластической и структурной (межэлементной). Наличие межэлементных деформаций в структурном теле отличает его от деформации компактного твёрдого тела (металла, дерева, пластика).

Структурные агрегаты почвы не имеют правильной геометрической формы. Взаимное расположение структурных агрегатов равновероятно, и все направления взаимодействия их тоже равновероятны. Каждый структурный агрегат почвы как компактного тела подчиняется законам сопротивления материалов внешним нагрузкам [16].

Поиск зависимости между внешним давлением и степенью уплотнения структуры почвы есть одна из задач теории сыпучих сред, которая изучалась во многих научных работах [17÷19]. В этих работах процесс уплотнения структурных тел рассматривается в сравнительно небольшом диапазоне изменения давлений и плотности однофазных тел с постоянной величиной сцепления. Эта сыпучая дисперсная система представлена тремя фазами: твёрдой, жидкой и газовой. Структурная почва формируется благодаря активному участию в почвообразовательном процессе растений, живых организмов (от макро- до микроорганизмов). Последним принадлежит роль переработки отмершей растительности в питательное вещество — гумус. Это органическое вещество обеспечивает укрупнение (слипание) и упрочнение (слияние) структурных элементов. Из этого следует, что деформационный механизм изменения формы тел является задачей уточнения взаимозависимости выше перечисленных процессов и нуждается в дальнейшем изучении.

Контактирующие структурные элементы в окрестности рассматриваемого контакта ограничены произвольными криволинейными поверхностями (оболочками) выпуклой формы. Но даже в том случае, когда каждый структурный агрегат почвы в окрестностях рассматриваемого контакта имеет сложную (дендритную) форму, она может быть представлена в виде модельной формы, геометрические закономерности деформации которой будут достаточно близкими к реальной. Форма поверхности структурного агрегата в окрестности рассматриваемого контакта с достаточной степенью вероятности приближения может быть выражена

математической зависимостью, характер которой изменяется в процессе деформирования. Это изменение определяется функцией:

$$\delta_k = F(A_k), \quad (5)$$

где:

δ_k — величина нормальной деформации;
 A_k — размер площадки контакта.

Определяем зависимость между величинами: силой сближения центров тяжести структурных тел в направлении (F_1-R) и размером образующейся площадки контакта, проектируемой на плоскость, нормальную направлению (рис. 2а). Величина

площадки контакта сечения A_k и предельное её значение A_{kp} при нормальной плотности почвы выразится зависимостью в виде:

$$A_z = a_1 + a_2(z/h_n)^\alpha, \quad (6)$$

где:

a_1 и a_2 — постоянные, определяемые из граничных условий;

h_n — толщина слоя приконтактной области деформирования — расстояние между площадками контакта от A_k до предельного значения A_{kp} по направлению (F_1-R).

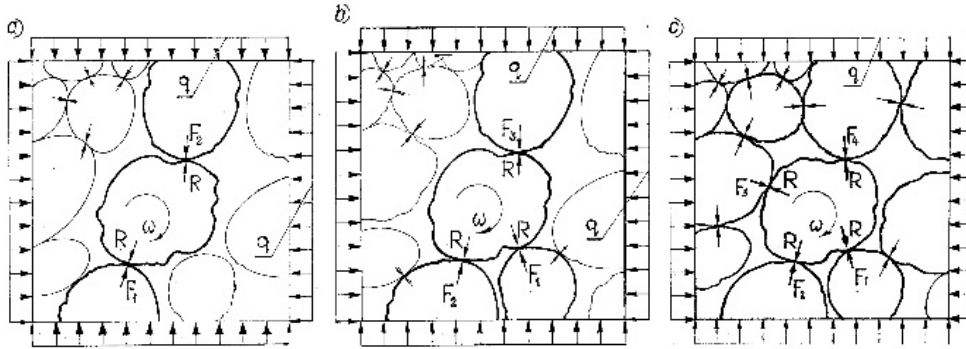


Рис. 2. Фрагменты с различным количеством взаимодействующих структурных элементов: трёх (а), четырёх (б) и пяти (с) элементов.

Изменяя показатель степени α , можно описать форму приконтактной области структурного элемента почвы. Выражение (6) представляет функциональную зависимость величины изменяющейся площадки сечения A_z контактной области элементов произвольной формы в текущий момент деформации. Граничные условия для выражения (6) при $z=0$ и $z=h_n$ равны соответственно $A_z=A_k$ и $A_z=A_{kp}$. Из совместного рассмотрения (6) и граничных условий получим:

$$a_1 = A_k; \quad a_2 = A_{kp} - A_k. \quad (7)$$

Подставив найденные значения a_1 и a_2 (7) в выражение (6), получим:

$$A_z = A_k + (A_{kp} - A_k)(z/h_n)^\alpha. \quad (8)$$

В начальный момент контактной деформации $A_k=0$, а $h_n=h_0$. Тогда выражение (8) принимает вид:

$$A_z = A_{kp}(z/h_n)^\alpha, \quad (9)$$

где h_0 — начальная высота приконтактной области структурного элемента.

Объём приконтактной области структурного элемента V_n можно определить из условия $V_n=V_0$:

$$V_n = \int_0^{h_n} A_z dz = \int_0^{h_n} [A_k + (A_{kp} - A_k)(z/h_n)^\alpha] dz. \quad (10)$$

Интегрируя выражение (10) в указанных пределах, получим:

$$V_n = \frac{A_{kp} + \alpha A_k}{\alpha + 1} \cdot h_n. \quad (11)$$

Согласно выражению (10) первоначальный объём V_{n0} рассматриваемой приконтактной области структурного элемента при условиях $A_{kp}=0$ и $h_n=h_{n0}$ равен:

$$V_{n0} = \int_0^{h_{n0}} A_z dz = A_{kk} \int_0^{h_{n0}} \left(\frac{z}{h_{n0}}\right)^2 dz = \frac{A_{kk} h_{n0}}{\alpha + 1}. \quad (12)$$

Принимая во внимание, что при активной пластической деформации объём материала структурного элемента почвы в приконтактной области остаётся постоянным ($V_n=V_{n0}$), имеем:

$$h_n = \frac{A_{kk} + \alpha A_{kp}}{\alpha + 1} \cdot \frac{A_{kk} h_{n0}}{\alpha + 1}. \quad (13)$$

Зависимость (13), представляющую собой условие не сжимаемости структурных элементов, можно переписать в следующем виде:

$$A_{kk}(h_{n0} - h_n) = \alpha A_{kp} h_n. \quad (14)$$

Разность $h_{n0} - h_n$ является величиной нормальной контактной деформации:

$$\delta_k = h_{n0} - h_n, \quad (15)$$

откуда получаем:

$$h_n = h_{n0} - \delta_k. \quad (16)$$

Рассматривая зависимость (14) совместно с выражениями (15) и (16), получим:

$$A_{kk} \delta_k = \alpha A_{kp} (A_{kp} - \delta_k). \quad (17)$$

Зависимость (17) можно переписать в более удобном виде:

$$\frac{A_{kp}}{A_{kk}} = \frac{\delta_k}{\alpha(h_{n0} - \delta_k)}. \quad (18)$$

На основании (18) можно предположить, что деформация структурного тела происходит, главным образом, за счёт нормальной деформации структурных элементов в контактной зоне и их относи-

$$dh = - \sum_{i=1}^{n_z} \left\{ \frac{1}{n_{si}} \sum_{i=1}^{n_{si}} \left[\frac{1}{K'_{ai}} \sum_{i=1}^{K'_{ai}} (d\delta'_{K_{ai}} + d\delta'_{K_{i+1}}) \cos \varphi_i + (dl_i + dl_{i+1}) \cos \tau_i \right] \right\}, \quad (19)$$

где:

- h — высота деформации (перемещения) структурных элементов;
- n_z — приведенное число слоёв элементов по величине перемещений;
- n_{si} — число элементов в рассматриваемом деформированном слое;
- K'_{ai} — число опорных контактов рассматриваемого структурного элемента;
- $d\delta'_{K_{ai}}$ и $d\delta'_{K_{i+1}}$ — величина нормальных деформаций структурного элемента;
- dl_i и dl_{i+1} — величина элементарных сдвигов при смятии контактов;
- φ_i и τ_i — величины углов нормального и касательного взаимодействия в зоне контакта структурного элемента соответственно.

Перейдя к среднестатистическим величинам и преобразовав полученные данные $d\delta'_{K_i} + d\delta'_{K_{i+1}} = d\delta_{sr}$ и $dl_i + dl_{i+1} = 2dl_{sr}$ величину деформации структурных элементов выразим в следующем виде:

$$dh = -n_z \cos \varphi \left(1 + 2 \frac{dl_{sr} \cos \tau}{d\delta_{sr} \cos \varphi} \text{tg} \varphi \right) d\delta_{sr} \quad (20)$$

а обозначив $\frac{\cos \tau}{\cos \varphi} = \varphi_\tau$ окончательно получим:

$$dh = -n_z \cos \varphi (1 + \psi \varphi_\tau) d\delta_{sr}. \quad (21)$$

Теперь можно определить приведенное число слоёв структурных элементов почвы по длине деформации n_z . Если N — общее число структурных элементов, а n_{sr} — их среднестатистическое число в рассматриваемом слое, то можно записать:

$$n_z = \frac{N}{n_{sr}}. \quad (22)$$

Общее статистическое число элементов деформируемого пласта почвы определённого объёма можно рассчитать по следующей формуле:

$$N = \frac{A_h}{K_0} \frac{h \varrho}{a_{sr}^2}, \quad (23)$$

где:

- A_h — номинальная площадь сечения пласта почвы;
- K_0 — коэффициент объёмной формы структурного элемента;
- a_{sr} — среднестатистический размер частицы;
- ϱ — относительная плотность структурного тела.

тельного сдвига при увеличении усилия сжатия на величину dF (тяговой силы или скорости движения). Тогда изменение высоты деформируемого структурного тела можно выразить следующим способом:

Среднестатистическое число структурных элементов в рассматриваемом деформируемом слое соответственно равно:

$$n_{sr} = \frac{A_h}{K} \frac{\varrho}{a_{sr}^2}, \quad (24)$$

где:

K — коэффициент плоскостной формы структурных элементов.

Рассматривая совместно зависимости (22)–(24), получим выражение для определения числа слоёв:

$$n_z = \frac{K}{K_0} \frac{h}{a_{sr}}. \quad (25)$$

Подставляя значение n_z (25) в зависимость (21), получим:

$$dh = - \frac{K}{K_0} \frac{h}{a_{sr}} \cos \varphi (1 + \psi \varphi_\tau) d\delta_{sr}. \quad (26)$$

Решая уравнение (26) относительно величины элементарного сближения частиц $d\delta_{sr}$, получим:

$$d\delta_{sr} = - \frac{K_0 a_{sr}}{K \cos \varphi (1 + \psi \varphi_\tau)} \frac{dh}{h}. \quad (27)$$

Допуская, что структурные элементы почвы при деформировании перемещаются параллельно оси пласта, и вводя ограничения на величины ψ и φ_τ , т.е. $\psi = \varphi_\tau$, запишем формулу (27) в следующем виде:

$$\frac{K_0}{K} \cos \varphi a_{sr} \frac{d\varrho}{\varrho}, \quad \text{где} \quad \frac{h}{a_{sr}} = - \frac{d\varrho}{\varrho}. \quad (28)$$

Теперь можно определить величину среднестатистического числа контактов, приходящихся на один структурный элемент при различных системах укладки элементов при деформировании почвы. Выполняя ряд преобразований зависимости величины относительного контактного сечения a_k от относительной плотности сжатого объёма почвы, определяющей деформационный механизм уплотнения структурного тела, приходим:

$$a_k = \varrho^2 \frac{\ln \beta_0 \varrho}{\ln \beta_0 \beta^2}, \quad (29)$$

где:

β_0 — начальная величина относительного объёма деформируемой почвы [19÷20].

Выражение (29) включает в себя все три возможных компонента деформации: упругую, пластическую и межэлементную. Эта зависимость учитывает влияние реальной формы приконтактной области структурного элемента.

В результате исследований [2] было установлено, что при изменении скорости обработки почвы более,

чем на 5 км /ч, на некотором расстоянии впереди корпуса плуга образуется выпучивание поверхности почвы, расстояние до которого увеличивается с увеличением скорости или силы тяги. Процесс обработки почвы сопровождается волновым характером релаксации напряжений.

Происходящие в полидисперсных системах процессы, имеют существенное отличие от процессов, происходящих в гомогенных средах. Это обусловлено свойствами слоёв раздела между структурными агрегатами. Известно, что молекулы и атомы, входящие в состав каждой поверхности, обладают избытком «свободной» энергии. Эту энергию можно представить зависимостью:

$$U=U_0+A\sigma, \quad (30)$$

где:

U — свободная энергия системы;

U_0 — свободная энергия всего объёма;

σ — избыток свободной энергии 1 см² поверхности пограничного слоя;

A — удельная поверхность системы.

С увеличением дисперсности возрастает произведение $A\sigma$, следовательно, возрастёт и её значение как слагаемой свободной энергии системы. Согласно второму закону термодинамики любой изотермический процесс, который протекает произвольно, уменьшает поверхностную энергию.

Уменьшение свободной поверхностной энергии происходит благодаря концентрированию дисперсионной среды на поверхности твёрдой фазы компонентов. Концентрирование компонентов дисперсионной среды (адсорбция) — функция многих переменных: электрических свойств среды,

присутствия в дисперсионной среде растворимых веществ, температуры и др. Поэтому между дисперсионной средой и дисперсной фазой устанавливается динамическое равновесие.

В любой момент времени на поверхности структурных агрегатов (дисперсной фазы) происходят сложнейшие процессы вытеснения и замещения одних молекул другими. Если к этому добавить, что адсорбция сопровождается рядом побочных явлений (растворение, химическое взаимодействие), то станут понятными процессы, происходящие в многокомпонентных системах.

Почвенная дисперсная фаза находится в постоянном взаимодействии с водной дисперсионной средой за исключением случаев её сильного высыхания, когда происходит замена водной дисперсионной среды газообразной. Причина этого — динамичность факторов (энергий), влияющих на это взаимодействие.

Заключение

Расчёт инженерных конструкций на надёжность и экономичность невозможно выполнить из-за разнородности взаимодействующих тел, одно из которых является дисперсной системой, а другое — монолит. В данной статье рассмотрен только вопрос деформирования структурного тела в процессе его формирования под воздействием внешних сил природы, результатом которого является появление избытка свободной энергии, связанной с удельной поверхностью структурных элементов.

Литература

1. Nerpin, S.V., Fizika pochv / S.V. Nerpin, A.F. Chudnovskiy. — M: Nauka, 1967.
2. Mekhanizatsiya zashchity pochvy ot vodnoy erozii / Pod red. A.T. Vagina / L.V. Larchenkov, A.Z. Piletskiy, P.P. Kostyukov i dr. — L: Kolos, 1977.
3. Larchenkov, L.V., Improvement of Machinery for Chemical Fertilizer Application with the Aim of achieving a More Even Spread over Agricultural Land. — Genève: Nations Unites, 1984.
4. Petrov, V.P., Razvitiye nauk o Zemle. Priroda metamorfizma / V.P. Petrov. — M: Mir, 1967.
5. Markov, K.K., Vvedeniye v fizicheskuyu geografiyu / O.P. Dobrodeyev, YU.A. Smirnov, I.A. Suyetova. — M: Mysl', 1970.
6. Uippl, F., Zemlya, Luna i planety / Per. s angl., 2 izd. — M: Nauka, 1967.
7. Dokuchayev, V.V., Ucheniye o zonakh prirody i klassifikatsiya pochv / V.V. Dokuchayev, soch. T. 6. — M: OGIZ; L: Sel'khozgiz, 1951.
8. Ukhov, S.B., Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty / S.B. Ukhov. — M: Vysshaya shkola, 2007.
9. Kachinskiy, N.A., Mekhanicheskiy i mikro agregatnyy sostav pochvy, metody yego izucheniya / N.A. Kachinskiy. — M: AN SSSR, 1958.
10. Polezhayev, YU.V., Raschotnaya model' protsessa erozionnogo razrusheniya kompozitsionnogo materiala / YU.V. Polezhayev, V.P. Romanchenkov, N.V. Chirkov, V.N. Shebeko. — M: IFM. — T. 37, № 3. — 1979.
11. Pirs, K., Eroziya / Pod red. K. Pirs, perevod s angl. YU.V. Polezhayeva. — M: Mir, 1982.
12. Landau, L.D., Statisticheskaya fizika / L.D. Landau, Ye.M. Lifshits. — M: Gosteizd. — 1951.
13. Landau, L.D., Mekhanika sploshnykh sred / L.D. Landau, Ye.M. Lifshits. — M: Gosteizd. — 1951.
14. Kudryavtsev, B.B., Primeneniye ul'traakusticheskikh metodov v praktike fiziko-khimicheskikh issledovaniy / B.B. Kudryavtsev. — M: Gostekhizd. — 1952.
15. Deryagin, B.V., Pribor dlya opredeleniya udel'noy poverkhnosti (rukovodstvo) / B.V. Deryagin, N.N. Zakhavayeva, M.V. Talayem. — M: Izd. AN SSSR. — 1963.

16. Zhdanovich, G.M., *Mekhanika poroshkovykh materialov* / G.M. Zhdanovich. — Minsk: Izd. BNTU. — 2013.
17. Belyayev, N.M., *Trudy po teorii uprugosti i plastichnosti* / N.M. Belyayev. — M: Gostekhizdat. — 1957.
18. Makushin, V.M., *Deformatsiya i napryazhonnoye sostoyaniye detaley v mestakh kontakta* / V.M. Makushin. — M: Mashgiz, 1952.
19. Saverin, M.M., *Kontakt'naya prochnost' materialov v usloviyakh odnovremennogo deystviya normal'noy i kasatel'noy nagruzok* / M.M. Saverin. — M: Mashgiz, 1946.
20. Bal'shin, M.YU., *Nauchnyye osnovy poroshkovoy metallurgii i metallurgii volokna* / M.YU. Bal'shin. — M: Metallurgiya, 1972.