

УДК 631.431

Б. И. ПОТАПОВ

ВЛИЯНИЕ СИЛ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ НА ВНЕШНЕЕ И ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ПОЧВЕ

Силы капиллярной природы оказывают влияние на механические свойства почвы при ее влажности, достаточной для формирования водных мостов по площадкам контакта между частицами и агрегатами, эти силы по величине существенно уступают силам молекулярного дальнего действия. Данные о структуре, внутриагрегатной пористости и объемном весе позволяют рассчитать интервал влажности почвы, соответствующий максимальному проявлению капиллярных сил.

Широко известна зависимость физико-механических свойств почвы от ее механического состава, развития макро- и микроструктуры, объемного веса и влажности [1, 4, 7, 13, 14].

Почвенная вода, проникая в межпакетные пространства частиц глинистых минералов, в пахотном слое вызывает набухание почвы, при взаимодействии с водой увеличиваются в объеме и теряют механическую прочность органо-минеральные коллоидные пленки на поверхности частиц первичных минералов, снижается общая механическая прочность пахотного слоя в естественном сложении [2, 3, 8, 12].

Вода образует пленки на поверхности частиц почвы, создает значительное расклинивающее давление, разъединяя соседние частицы по площадкам контактов и вызывая ряд отрицательных явлений, например просадочность лёссовых грунтов [4, 5].

Пленки жидкости на поверхности частиц почвы ослабляют молекулярные и ионно-электростатические силы взаимодействия между частицами и агрегатами, что сказывается на механических свойствах почвы [4, 11, 12]. Если по площадкам контакта между частицами и агрегатами образуются кольцевые водные мениски, возникают силы капиллярной природы, которые оказывают заметное влияние на изменение сил взаимодействия между контактирующими поверхностями [1, 4, 11, 13].

В настоящей работе сделана попытка оценить влияние сил капиллярной природы на величину сил внешнего и внутреннего трения в почве.

Из молекулярной физики известно, что давление в объеме жидкости, имеющем криволинейную поверхность на границе с воздухом, отличается от атмосферного на некоторую величину Δp . Эта величина определяется поверхностным натяжением жидкости σ на границе с воздухом и главными радиусами кривизны поверхности жидкости R_1 и R_2 . Абсолютное значение Δp определяется по формуле Лапласа:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (1)$$

Рассмотрим водный кольцевой мениск с радиусами кривизны поверхности R_1 и R_2 , образовавшийся в зазоре между двумя частицами «а» и «б» (рис. 1).

Под вогнутой поверхностью мениска, образуемой R_1 , во всем объеме кольцевого водного мениска давление в жидкости меньше атмосферного

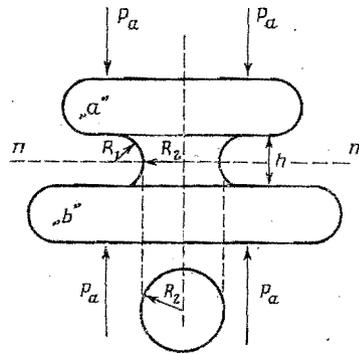
на величину Δp . Поэтому внешнее атмосферное давление P_a воздействует на частицы «а» и «b», стремясь сжать заключенный между ними объем воды.

Вода является практически несжимаемой жидкостью, частицы оказываются прижатыми друг к другу силой, равной по величине Δp , но обратной ему по знаку. Если площадь сечения мениска по nn_1 равна S или πR_2^2 , то сила $-P_k$, стремящаяся прижать частицы «а» и «b» друг к другу

$$P_k = \Delta p \pi R_2^2 \quad (2)$$

R_2 — является положительным, поэтому сила поверхностного натяжения γ , действующая по периметру мениска l , препятствует выдавли-

Рис. 1. Схема водного кольцевого мениска по площадке контакта между двумя частицами почвы



ванию воды из зазора между частицами «а» и «b» давлением P_k , она измеряется

$$\gamma = \sigma' l = 2\sigma \pi R_2 \quad (3)$$

Как следует из выражений (1) и (2), сила P_k зависит от влажности почвы (величины R_1 и R_2). Если объемный вес почвы постоянен, то $h = \text{const}$ (рис. 1), сила капиллярной природы P_k может увеличиваться за счет объема (площади сечения) мениска — роста влажности почвы путем увеличения R_2 . В случае увеличения плотности почвы ($h \rightarrow 0$, $R_1 \rightarrow 0$) и неизменном объеме водного кольцевого мениска (влажности почвы) возрастает площадь S сечения мениска по nn_1 , уменьшается R_1 при одновременном увеличении R_2 , что вызывает рост Δp и P_k .

Таким образом, силы капиллярной природы влияют на механические свойства почвы при некоторой ее влажности, соответствующей образованию кольцевых менисков по площадкам контакта между частицами и агрегатами. Силы капиллярной природы (P_k) меняются по величине в некотором интервале влажности почвы, при увеличении плотности почвы увеличение действия капиллярных сил достигается при меньшей влажности почвы.

Экспериментальные исследования подтверждают данные положения.

Для эксперимента использована дерново-подзолистая среднесуглинистая почва с удельным весом твердой фазы $2,59 \text{ г/см}^3$, содержанием гумуса 4,05% (по Тюрину), взятая в поле из-под картофеля в овощном севообороте совхоза «Пригородный» Ленинградской обл. Высокое содержание гумуса в почве вызвано ежегодным внесением повышенных доз органических удобрений (навоз, торф).

Сухим просеиванием из образца почвы мы выделили фракции 0,50—1,0, <1,00 мм и <0,25 мм. Фракция 0,50—1,00 мм служила в опытах моделью макроструктурной почвы, фракция <1,0 мм — моделью почвы, содержащей одновременно в свободном состоянии макро-, микроагрегаты и первичные частицы твердой фазы.

Механический и микроагрегатный состав почвы

Фракция, мм	Вид анализа	Содержание механических элементов (%) различного размера, мм					
		1,00—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	< 0,001
<1,00	Механический	3,40	18,6	30,05	11,35	23,80	12,80
	Механический Микроагрегатный	—	27,55	46,37	9,59	14,22	2,37
<0,25	Микроагрегатный	—	24,74	30,57	10,22	22,34	12,38

По методу Качинского во фракциях <1,00 мм и <0,25 мм определили механический и микроагрегатный состав (табл. 1).

Во фракции 0,50—1,00 мм по методике Агрофизического института [9] насыщением под вакуумом обезвоженным керосином мы определили внутриагрегатную пористость $v_{\text{ВАП}}$, которая составила 41,2% от общего объема агрегатов. Отношение объема пор $v_{\text{ВАП}}$ в агрегатах к объему слагающей агрегаты твердой фазы v_T

$$\varepsilon_a = v_{\text{ВАП}}/v_T = 0,70 \quad (4)$$

Навески из фракций 0,50—1,00 мм и <1,00 мм увлажняли из бюретки до влажности 12,0—35,0% веса абсолютно сухой почвы и на 72 часа помещали в камеру с влажностью воздуха, близкой к насыщению. Через 3 суток подготовленные навески использовали для определения предельного сопротивления почвы деформации сдвига τ (силы внутреннего трения) и силы внешнего трения F (трения почва—металл) [13].

Для измерения величин τ и F использовали прибор, принципиальная схема которого описана ранее [15]. Увлажненную навеску почвы через 72 часа набивали в обойму прибора; плотность набивки почвы (ее объемный вес) в обойме прибора контролировали по высоте образца с точностью 0,01 мм индикатором часового типа.

Навески макроструктурной фракции (0,50—1,00 мм) для избежания разрушения макроагрегатов набивали в обойму прибора до объемного веса $\rho = 1,10 \text{ гсм}^{-3}$.

Навески из фракции <1,00 мм, включающей как макро-, так и микроагрегаты, набивали в обойму прибора до различных ступеней уплотнения $\rho = 1,15—1,45 \text{ гсм}^{-3}$.

Наименьшая плотность фракции <1,00 мм выбрана равной $1,15 \text{ гсм}^{-3}$ в связи с тем, что при более рыхлом сложении образцы самоуплотнялись в процессе эксперимента под действием внешнего нормального давления.

После необходимого уплотнения (ρ) ко всем образцам прилагалось внешнее нормальное давление $N = 476 \text{ гсм}^{-2}$ и производилось определение сил внутреннего τ или внешнего F трения в 3-кратной повторности.

Результаты определения τ и F для фракций 0,50—1,00 мм и <1,00 мм при близких значениях объемного веса ρ и $N = 476 \text{ гсм}^{-2}$ приведены в табл. 2. Погрешность определений не превышала 2,6—5,0%.

Эксперимент свидетельствует о зависимости величин τ и F от структурного состояния почвы и ее влажности. При постоянных значениях ρ ($1,10$ и $1,15 \text{ гсм}^{-3}$) в макроструктурных образцах (0,50—1,00 мм) капиллярные силы наиболее полно проявились при влажности почвы 25,6—31,4%, в образцах из фракции <1,00 мм при влажности 17,5—21,3%.

Изменение F в зависимости от влажности почвы более существенно, чем τ , что уже отмечалось ранее [13, 14].

Таблица 2

Влияние структурного состояния и влажности почвы на силы внутреннего τ и внешнего F трения

Фракция, мм	ρ , гсм ⁻³	Измеряе- мые пара- метры, гсм ⁻²	Влажность, % от веса							
			12,0	15,0	17,5	19,1	21,3	25,6	31,4	35,0
0,50—1,00	1,10	τ	404,5	404,5	401,0	409,5	402,3	420,0	456,5	447,0
		F	289,1	287,3	292,1	302,7	306,3	315,5	382,5	402,0
<1,00	1,15	ρ	1,09	1,09	1,10	1,10	1,09	1,10	1,10	1,16
		τ	310,9	310,9	319,1	325,3	347,0	350,9	380,7	
		F	259,6	272,8	272,8	291,9	293,7	277,0	264,8	
		ρ	1,15	1,15	1,16	1,15	1,16	1,19	1,21	

Проанализируем условия проявления сил капиллярной природы в образцах из фракции 0,50—1,00 мм при объемном весе почвы $\rho=1,10$ гсм⁻³. Как было указано выше, объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}}$ в этой фракции составляет 0,7 от объема твердой фазы v_{T} в агрегатах. Учитывая удельный вес твердой фазы почвы $d=2,59$ гсм⁻³, объемный вес $\rho=1,10$ гсм⁻³ определим долю твердой фазы в объеме всего образца v :

$$v_{\text{T}} = v \frac{\rho}{d} = 0,424v. \quad (5)$$

Тогда

$$v_{\text{ВАП}} = 0,7v_{\text{T}} = 0,297v. \quad (6)$$

Зная объем твердой фазы почвы $v_{\text{T}}=0,424v$ в образце, удельный вес почвы $d=2,59$ гсм⁻³, объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}}=0,297v$ и плотность воды $\rho_{\text{в}}=1,0$ гсм⁻³. Определим влажность почвы W_1 , соответствующую заполнению внутриагрегатных пор водой:

$$W_1 = \frac{d \cdot v_{\text{T}}}{v_{\text{ВАП}} \rho_{\text{в}}} \cdot 100 = 27,0\% \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при влажности почвы (фракция 0,50—1,00 мм), близкой к 27,0%, внутриагрегатные поры заполнены водой, на поверхности агрегатов есть пленка жидкости, поэтому по площадкам контакта соседних агрегатов создаются условия для образования водных кольцевых менисков и проявления сил капиллярной природы. Данные табл. 2 свидетельствуют, что заметное влияние капиллярных сил $P_{\text{к}}$ на τ и F во фракции 0,50—1,00 мм наблюдается при влажности почвы 25,6%, поскольку часть внутриагрегатных пор занята заземленным воздухом [4, 9, 11].

Твердая фаза v_{T} в макроструктурном образце из фракции 0,50—1,00 мм в соответствии с зависимостью (5) занимает объем, равный 0,424 v , поэтому суммарный объем пор $v_{\text{П}} = v - 0,424v = 0,576v$, он близок к объему пор в идеальной почве при гексагональной упаковке [11]. Известно, что при гексагональной упаковке макроагрегатов формирование кольцевых менисков жидкости по площадкам контакта между макроагрегатами завершается при заполнении водой 20,6% объема меж-агрегатных пор [17].

Поскольку суммарный объем пор $v_{\text{П}}=0,576v$, объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}}$ в соответствии с (6) равен 0,297 v , определим объем воды в меж-агрегатных порах $v_{\text{М}}$, соответствующий формированию кольцевых менисков:

$$v_{\text{М}} = (v_{\text{П}} - v_{\text{ВАП}}) 0,206 = 0,057v. \quad (8)$$

Отсюда максимальное проявление сил капиллярной природы в образцах из фракции 0,50—1,00 мм равно W_2 :

$$W_2 = \frac{(v_{\text{ВАП}} + v_{\text{М}}) \rho_b}{d \cdot v_{\text{T}}} 100 = \frac{0,354v \cdot 1,0 \text{ гсм}^{-3}}{0,424v \cdot 2,59 \text{ гсм}^{-3}} \cdot 100 = 32,2\% \quad (9)$$

Как следует из табл. 2, максимальное влияние влажности (сил капиллярной природы) на величину τ и F для фракции 0,50—1,00 мм наблюдается при $W_2=31,4\%$. При более высокой влажности происходит увеличение плотности почвы в образце ($\rho=1,16 \text{ гсм}^{-3}$), поэтому более высокая влажность исключается из рассмотрения.

Таким образом, влияние сил капиллярной природы на сопротивление макроструктурной почвы деформации проявляется в узком интервале влажности (25,6—31,4%), соответствующем образованию менисков в межагрегатных порах. Это свидетельствует о несостоятельности расчета действия капиллярных сил на механические свойства почв без учета дифференциальной пористости [18].

Проанализируем проявление сил капиллярной природы при изменении величин τ и F в зависимости от влажности почвы, состоящей из фракции $<1,00 \text{ мм}$ при $\rho=1,15 \text{ гсм}^{-3}$ (табл. 2).

Фракция $<1,00 \text{ мм}$ содержала 51,65% макроагрегатов диаметром 0,25—1,00 мм и фракцию $<0,25 \text{ мм}$ (48,35%). Из табл. 1 следует, что фракция $<0,25 \text{ мм}$ содержит 20,6% микроагрегатов диаметром 0,01—0,25 мм. Следовательно, фракция $<1,00 \text{ мм}$ содержит в своем составе 61,61% макро- и микроагрегатов (0,01—1,00 мм) от веса образца.

Пользуясь зависимостью (5), определим объем твердой фазы в образце, равном $v_{\text{T}}=0,444v$, объем пор $v_{\text{П}}=0,556v$. Поскольку сумма макро- и микроагрегатов составляет 61,61% от веса фракций $<1,00 \text{ мм}$, объем твердой фазы, приходящейся на агрегаты $v_{\text{ТА}}=v_{\text{T}} \cdot 0,6161 = 0,273v$. В соответствии с зависимостью (4) объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}} \approx 0,7v_{\text{ТА}} = 0,191v$. Фактически он несколько меньше, поскольку известно, что пористость микроагрегатов существенно меньше пористости макроагрегатов. Располагая величинами v_{T} , $v_{\text{ВАП}}$ ρ_b (плотности воды) и d (удельный вес твердой фазы почвы), определим влажность почвы W_1 , соответствующую заполнению водой внутриагрегатных пор в образцах из фракции $<1,00 \text{ мм}$

$$W_1 = \frac{v_{\text{ВАП}} \cdot \rho_b}{v_{\text{T}} \cdot d} \cdot 100 = 16,6\% \quad (10)$$

Данные табл. 2 свидетельствуют, что в образцах фракции $<1,00 \text{ мм}$ заметное влияние на величину τ и F силы капиллярной природы оказывают при влажности почвы, начиная с 17,5%. Зависимость (10) не учитывает смоченность поверхности свободных первичных частиц твердой фазы во фракции $<1,00 \text{ мм}$ и дает несколько заниженный результат в сравнении с экспериментом.

В связи с тем, что нам известен объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}}=0,191v$ и общий объем пор $v_{\text{П}}=0,556v$ в образце из фракции диаметром $<1,00 \text{ мм}$, объем межагрегатных пор в такой системе — $v_{\text{МАП}}=v_{\text{П}}-v_{\text{ВАП}}=0,365v$.

Сделаем весьма грубое допущение, предположив, что в образце из фракции $<1,00 \text{ мм}$ макро-, микроагрегаты и свободно существующие первичные частицы твердой фазы могут быть упакованы гексагонально. Тогда объем водных менисков по площадкам контакта между элементами структуры $v_{\text{М}}$ будет равен $v_{\text{ВАП}} \cdot 0,206 = 0,075v$. Следовательно, максимального действия сил капиллярной природы на силы внутреннего τ и внешнего F трения в образцах из фракции $<1,00 \text{ мм}$ при $\rho=1,15 \text{ гсм}^{-3}$ мы вправе ожидать при влажности почвы W_2 , когда вла-

гой заполнен объем внутриагрегатных пор $v_{\text{ВАП}}$ и сформировались кольцевые мениски по площадкам контакта между элементами структуры v_M или:

$$W_2 = \frac{(v_{\text{ВАП}} + v_M) \rho_b}{v_T \cdot d} \cdot 100 = 23,1\% \quad (11)$$

где ρ_b — плотность воды, d — удельный вес твердой фазы почвы.

В эксперименте (табл. 2) максимальное влияние сил капиллярной природы на величину τ и F в образцах из фракции $< 1,00$ мм наблюдается при влажности почвы 21,3%.

Сравнение зависимостей (7) и (10), а также (9) и (11) свидетельствует, что в макроструктурной почве (фракция 0,50—1,00 мм), обладающей более высокой внутриагрегатной пористостью, влияние сил капиллярной природы на силы внешнего F и внутреннего τ трения в

Таблица 3
Зависимость сил внешнего F и внутреннего τ трения в почве от влажности и объемного веса твердой фазы

Показатель	ρ_s , гсм ⁻³	Влажность почвы, % от веса ρ_s					
		12,0	15,0	17,5	19,1	21,3	25,6
τ гсм ⁻²	1,15	310,9	310,9	319,1	325,3	347,0	350,9
	1,21	413,3	438,0	444,2	447,5	464,7	465,8
	1,30	502,9	506,1	521,2	577,6	592,8	559,0
	1,37	533,5	557,0	617,2	605,0	582,5	524,7
	1,45	—	679,9	650,5	649,0	647,4	534,7
F гсм ⁻²	1,15	256,9	272,8	272,8	291,9	293,5	277,0
	1,21	287,9	291,9	290,8	305,5	310,7	281,4
	1,30	290,3	300,7	305,2	328,1	291,2	291,3
	1,37	241,8	243,5	262,5	289,2	302,4	286,8
	1,45	—	233,6	233,6	240,6	247,4	253,8
F/τ	1,15	0,82	0,87	0,85	0,90	0,84	0,79
	1,21	0,70	0,67	0,65	0,68	0,67	0,61
	1,30	0,57	0,59	0,58	0,50	0,54	0,52
	1,37	0,45	0,43	0,42	0,47	0,52	0,52
	1,45	—	0,36	0,36	0,38	0,40	0,47

почве должно проявляться при более высокой влажности, чем в почве, где одновременно содержатся в свободном состоянии макро-, микроагрегаты и первичные частицы (фракция $< 1,00$ мм). Интервал влажности почвы, в котором наблюдается действие сил капиллярной природы, невелик и соответствует моменту формирования кольцевых водных менисков по площадкам взаимного контакта элементов структуры, что подтверждается результатами эксперимента (табл. 2).

Объемный вес почвы в пахотном слое под действием внешних факторов и в зависимости от структурного состояния почвы изменяется в весьма широких пределах [2, 4, 7, 16].

На примере образцов из фракции $< 1,00$ мм мы проследили влияние влажности почвы на изменение силы трения почва — металл F и силы внутреннего трения в почве τ в зависимости от объемного веса твердой фазы в интервале 1,15—1,45 гсм⁻³ на образцах с нарушенным сложением (табл. 3). Повторность определения величин τ и F 3-кратная, отклонения от средней величины τ и F , представленной в таблице, не превышали $\pm 6,0\%$. Нормальное давление на образцы во всех случаях составляло 476 гсм⁻².

Как следует из табл. 3, сила внутреннего трения в почве τ при постоянном значении влажности неуклонно растет с увеличением объемного веса ρ твердой фазы почвы, что связано с увеличением числа и

суммарной площади взаимных контактов между частицами и агрегатами в образце при увеличении плотности почвы. Увеличение суммарной площади контактов, сужение пор при увеличении ρ почвы создают условия для максимального проявления по площадкам контакта действия сил молекулярной и капиллярной природы [4, 6, 11, 13].

Сила трения почва — металл F с ростом объемного веса почвы в интервале $\rho=1,15-1,30 \text{ гсм}^{-3}$ при постоянных значениях влажности увеличивается. Дальнейшее уплотнение почвы ($\rho=1,37-1,45 \text{ гсм}^{-3}$) сопровождается уменьшением величины F (табл. 3). В начале работы в равенствах (1) и (2) показано, что действие сил капиллярной природы по площадке контакта между двумя частицами или частицей и плоской поверхностью металла (рис. 1) зависит от расстояния между контактирующими поверхностями h (радиуса кривизны мениска R_1) и площади кольцевого водного мениска (R_2).

Уплотнение образцов почвы ($\rho=1,15-1,30 \text{ гсм}^{-3}$) до момента разрушения макроагрегатов сопровождается уменьшением расстояния $h=2R_1$ между контактирующими поверхностями агрегатов и частиц почвы и поверхностью металла, что приводит к изменению радиусов кривизны кольцевых водных менисков по площадкам контакта (R_1 — уменьшается, R_2 — возрастает). Поэтому в соответствии с зависимостью (2) сила капиллярной природы P_k на границе почва — металл возрастает, увеличивается сила трения почва — металл (F).

Дальнейшее уплотнение образцов почвы ($\rho=1,37-1,45 \text{ гсм}^{-3}$) сопровождается разрушением почвенной макроструктуры, уменьшением объема межагрегатных пор. Влага из внутриагрегатных пор, разрушившихся макроагрегатов, переходит в межагрегатные поры, часть пор целиком заполняется водой. Избыток влаги создает эффект гидродинамической смазки на границе с металлом, снижающий величину силы трения почва — металл [1, 13, 14].

В табл. 3 показано, что с увеличением объемного веса почвы отношение F/τ неуклонно уменьшается. Последнее обстоятельство вызвано тем, что сила внутреннего трения в почве τ в значительной степени определяется силами молекулярного взаимодействия по площадкам контакта между частицами и агрегатами [13, 14]. Вклад сил молекулярного взаимодействия вырастает с увеличением плотности почвы благодаря увеличению числа и площади контактов частиц и агрегатов почвы. Сила трения почва — металл F определяется главным образом действием сил капиллярной природы и величиной внешней нормальной нагрузки. При постоянной внешней нормальной нагрузке $N=476 \text{ гсм}^2$ с увеличением плотности образцов почвы ($\rho=1,15-1,45 \text{ гсм}^{-3}$) фактическое нормальное давление на единицу площади истинного контакта почва — металл уменьшается пропорционально росту величины ρ , что приводит к уменьшению силы трения почва — металл, а следовательно, и отношения F/τ [6, 13, 14].

Из данных табл. 3 следует, например, что при плотности почвы в образце $\rho=1,15 \text{ гсм}^{-3}$ абсолютный прирост величины τ под действием сил капиллярной природы составил $36,1 \text{ гсм}^{-3}$, а при $\rho=1,37 \text{ гсм}^{-3}$ — $84,0 \text{ гсм}^{-3}$.

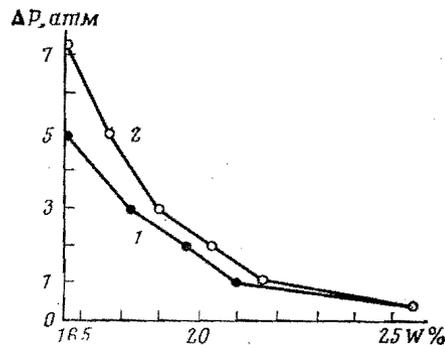
Сужение пор при увеличении плотности почвы до $\rho=1,37 \text{ гсм}^{-3}$ — R_1 в зависимости (1) стремится к минимуму, приводит к увеличению капиллярного давления Δp . Влияние уплотнения почвы в интервале $1,15-1,37 \text{ гсм}^{-3}$ на величину Δp (атм) мы определили с помощью мембранного пресса, в который помещали водонасыщенные образцы из фракций $<1,00 \text{ мм}$ при $\rho=1,15$ и $\rho=1,37 \text{ гсм}^{-3}$. Путем создания избыточного давления воздуха в камере мембранного пресса была определена величина Δp (атм) в образцах в интервале влажности почвы от полного насыщения до 16,5% от веса почвы (рис. 2). Как следует из рис. 2, величина Δp , а следовательно, и вклад сил капиллярной приро-

ды P_k в силы трения τ и F при объемном весе почвы $1,37 \text{ гсм}^{-3}$ выше, чем при $\rho = 1,15 \text{ гсм}^{-3}$.

Пахотный слой почвы в естественных условиях в зависимости от интенсивности поступления и испарения влаги во времени поочередно подвергается переувлажнению и иссушению, что является одной из причин изменения объемного веса почвы по глубине пахотного слоя [16].

Высокая влажность почвы способствует набуханию органо-минеральных пленок на поверхности частиц твердой фазы почвы. Молекулы гуминовой кислоты органо-минеральных пленок образуют полимерные цепи, которые в условиях повышенной влажности почвы за счет свобод-

Рис. 2. Зависимость капиллярного давления ΔP от влажности W при различном объемном весе почвы
1 — объемный вес почвы $1,15 \text{ гсм}^{-3}$, 2 — $1,37 \text{ гсм}^{-3}$



ных карбоксильных и гидроксильных групп способствуют образованию связей между поверхностями частиц и агрегатов по площадкам взаимных контактов [2, 8].

Последующее иссушение почвы приводит к возникновению связей между контактирующими поверхностями за счет сил Ван-дер-Ваальса [2, 6, 11].

Возникновением дополнительных связей образованием органо-минеральных «спаек» по площадкам контакта между агрегатами и частицами при подсушивании — следует объяснить повышенную механическую прочность монолитов почвы в сравнении с образцами почвы с нарушенным сложением при одинаковом объемном весе почвы.

По методике, описанной в начале статьи, образцы из фракции $0,50-1,00 \text{ мм}$ и фракции $<1,00 \text{ мм}$ увлажняли до влажности 35,0 и 31,4% веса почвы. Затем образцы переносили в обойму прибора и уплотняли до $\rho = 1,10 \text{ гсм}^{-3}$ (фракция $0,50-1,00 \text{ мм}$) и $\rho = 1,15 \text{ гсм}^{-3}$ (фракция $<1,00 \text{ мм}$). После этого образцы подвергали сушке в интервале влажности от 31,4 (35,0) до 15,0% к весу. Дальнейшее подсушивание вызывало усадку, а затем и растрескивание образцов и по этой причине не проводилось. Послед достижения необходимой влажности почвы в образце повторно определяли его плотность, к образцам прилагали внешнее давление $N = 476 \text{ гсм}^{-2}$ и они испытывались на предельное сопротивление деформации сдвига (τ).

В табл. 4 приведены для сравнения результаты определения τ в образцах из указанных фракций с нарушенным сложением без применения предварительной сушки — варианты 1 и 3 (воздушно-сухая почва перемешивалась с соответствующим количеством воды). Варианты 2 и 4 соответствуют естественному сложению почвы, которое является результатом попеременного увлажнения и иссушения почвы. Образцы, подвергнутые подсушиванию после предварительного увлажнения, оказали значительно большее сопротивление деформации сдвига τ , чем образцы из тех же фракций с нарушенным сложением.

Следовательно, увеличение механической прочности образцов почвы при подсушивании в условиях $\rho = \text{const}$ связано не с действием сил капиллярной природы, а с возникновением вторичных связей по площадкам взаимных контактов между частицами и агрегатами за счет

Таблица 4

Сила внутреннего трения в образцах почвы с нарушенным и естественным сложением

Фракция, мм	Вариант	Начальная ρ , $гсм^{-3}$	Измеряемые параметры	Влажность почвы, % от веса				
				15,0	17,5	19,1	21,3	25,6
0,50—1,00	1	1,10	τ $гсм^{-2}$	404,5	401,0	409,5	402,5	420,0
			ρ $гсм^{-3}$	1,09	1,10	1,10	1,09	1,10
<1,00	2	1,10	τ $гсм^{-2}$	606,2	564,8	581,7	574,4	553,7
			ρ $гсм^{-3}$	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
	3	1,15	τ $гсм^{-2}$	310,9	319,1	325,3	347,0	350,9
			ρ $гсм^{-3}$	1,15	1,16	1,15	1,16	1,19
	4	1,15	τ $гсм^{-2}$	739,5	713,3	706,1	671,6	590,3
			ρ $гсм^{-3}$	1,18	1,18	1,15	1,15	1,15

действия сил Ван-дер-Ваальса при объединении гелеобразных оболочек контактирующих частиц почвы при сушке. Силы молекулярного дальнего действия значительно превосходят силы капиллярной природы [11]. В образцах с ненарушенным сложением (вариант 2 и 4) суммарное сопротивление деформации сдвига τ определяется главным образом действием молекулярных сил и возрастает по мере уменьшения влажности почвы. Действие капиллярных сил заметно проявляется после нарушения естественного сложения почвы в ходе деформаций, например при механической обработке почвы [13, 14].

Чем больше число и суммарная площадь контактов элементов структуры твердой фазы в пахотном слое почвы, тем более существенно увеличение прочностных свойств в объеме почвы в процессе сушки. Как следует из табл. 4, сушка привела к большему росту τ в образцах из фракции <1,00 мм, чем в образцах из фракции 0,50—1,00 мм. Известно, что связанные почвы с менее развитой структурой в естественном сложении характеризуются наибольшим сопротивлением механической обработке [1, 7].

Выводы

1. Силы капиллярной природы оказывают влияние на внешнее и внутреннее трение в почве в момент образования водных кольцевых менисков по площадкам контакта между агрегатами и частицами твердой фазы и проявляются в узком интервале влажности почвы.

2. Вклад сил капиллярной природы в прочностные характеристики почвы существенно уступает по значению влиянию сил молекулярной природы и в глинистых почвах при естественном сложении пахотного слоя нивелируется действием сил Ван-дер-Ваальса.

3. Информация о структурном состоянии, внутриагрегатной пористости и объемном весе почвы позволяет с достаточным приближением определить нижнюю и верхнюю границы влажности почвы, соответствующие действию сил капиллярной природы на внешнее и внутреннее трение в почве.

Литература

1. Бахтин П. У. Исследования физико-механических и технологических свойств основных типов почв СССР. «Колос», 1969.
2. Вершинин П. В. Механизм формирования макроструктуры почвы. Сб. тр. по агроном. физике, вып. 4, 1948.
3. Горбунов Н. И. Почвенные коллоиды. Изд-во АН СССР, 1957.
4. Денисов Н. Я. О природе деформаций глинистых пород. Изд-во Мин. речн. флота СССР, М., 1951.
5. Дерягин Б. В., Кусаков М. М. Определение зависимости расклинивающего давления от толщины гидратных пленок воды на минеральных частицах. В сб.: Современные исследования физико-химических свойств почвы, т. 4, вып. 3. Изд-во АН СССР, 1948.
6. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. «Химия», 1967.

7. Качинский Н. А. Свойства почвы как фактор, определяющий условия работы сельско-хозяйственных машин. Почвоведение, 1937, № 8.
8. Кононова М. М. Органическое вещество почвы (его природа, свойства и методы изучения). Изд-во АН СССР, 1963.
9. Лытаев И. А. Быстрый метод определения порозности почвенных агрегатов в вакууме. Почвоведение, 1966, № 1.
10. Нерпин С. В., Потапов Б. И. Особенности реологических свойств структурных почв. Сб. тр. по агроном. физике. Гидрофизика и структура почвы, вып. 11, Л., 1965.
11. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. М., Физматгиз, 1967.
12. Овчаренко Ф. Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев, Изд-во АН УССР, 1961.
13. Потапов Б. И. О трении в почве и его зависимости от сил различной природы. Почвоведение, 1973, № 9.
14. Потапов Б. И. Внешнее и внутреннее трение в почве. Сб. тр. по агроном. физике, вып. 31, Л., Гидрометеиздат, 1973.
15. Потапов Б. И. О влиянии влажности и уплотнения почв на предельное сопротивление их сдвигу. Почвоведение, 1966, № 4.
16. Ревут И. Б., Абросимова Л. Н. и др. Пути регулирования почвенных условий жизни растений. Л., Гидрометеиздат, 1971.
17. Fischer R. A. On the capillary forces in a ideal Soil, J. Agric. Sci., v. 16, L, 1926.
18. Towner S. A., Childs E. C. The mechanical Strength of unsaturated porous granular material., J. Soil Sci., v. 23, № 4, 1972.

Агрофизический НИИ
ВАСХНИЛ

Дата поступления
22.II.1974 г.

В. И. ПОТАПОВ

EFFECT OF CAPILLARY FORCES ON EXTERNAL AND INTERNAL FRICTION IN SOIL

Capillary forces affect mechanical soil properties in a narrow interval of moisture on filling the inter—aggregate pores with water and on the formation of water ring menisci along the contact surfaces between aggregates and particles.

The available information about the structure, inter—aggregate porosity and volume weight of the soil allows a sufficiently precise determination of moisture interval which corresponds to capillary forces effect on the mechanical properties of soil by means of calculation.